

DE ZON



COLIN STUART

EEN NIEUWE BLIK OP ONZE
REBELSE STER

IN SAMENWERKING MET
NewScientist

INHOUD

Inleiding **8**

1 Van bijgeloof naar wetenschap **12**

2 De regenboog ontwarren **26**

3 De geboorte van een ster **42**

4 Een nucleaire krachtpatser **60**

5 De epische reis van zonlicht **76**

6 Zonnevlekken en de zonnecyclus **90**

7 Sterrenexplosies **106**

8 Coronaraadsels **124**

9 De zonnewind **140**

10 Leven met de zon **154**

11 De poort naar de interstellaire ruimte **170**

12 Bewegen door de Melkweg **186**

13 Licht uit! **202**

Conclusie: Zonnige toekomst? **216**

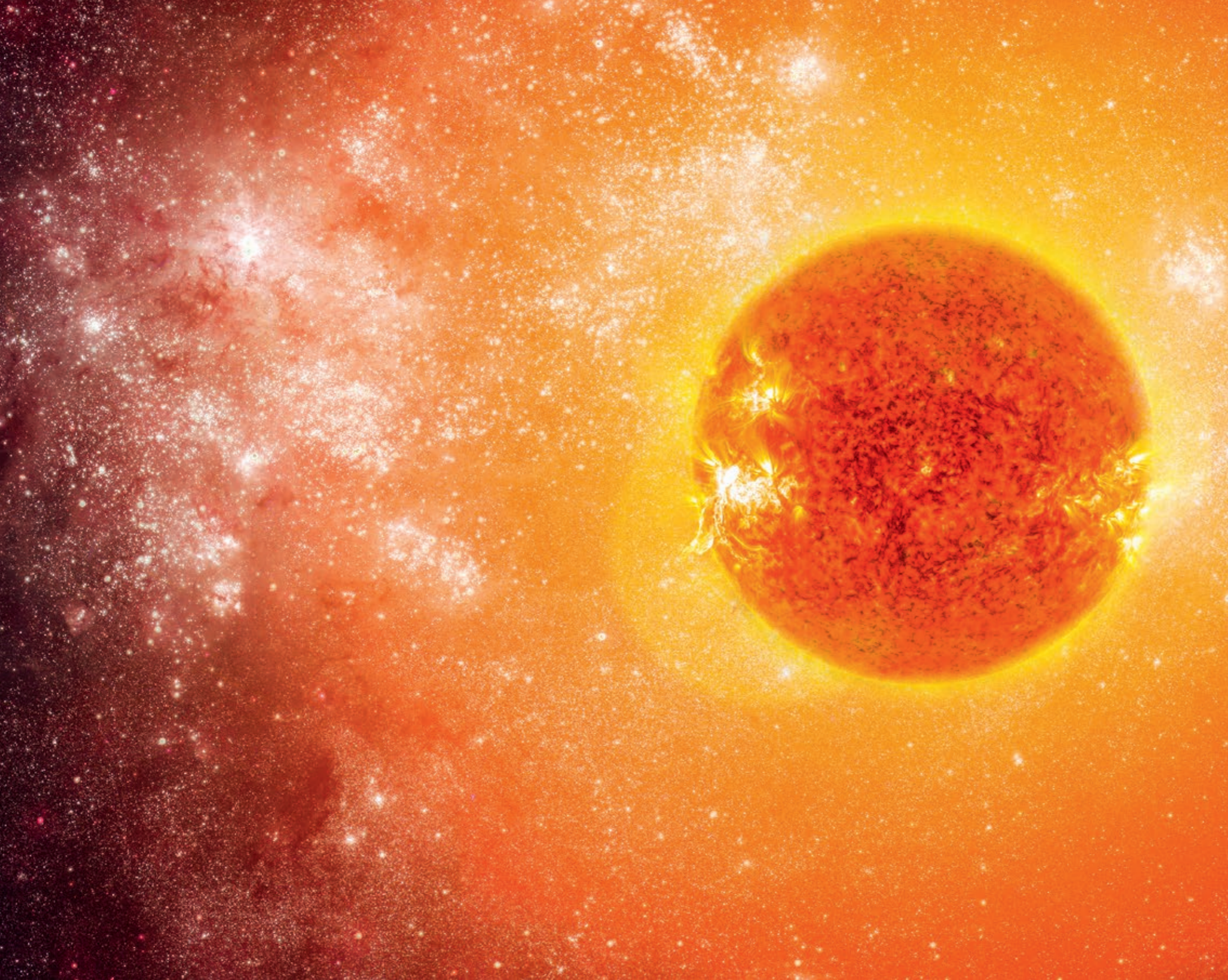
Dankwoord **220**

Verklarende woordenlijst **222**

Bronvermelding illustraties **230**

Index **231**





INLEIDING

De zon is vele dingen: schoonheid, baken, krachtbron, strijdlustig. Zij onderhoudt ons, maar bedreigt ons ook. Dat ze onze huid verbrandt vanaf een afstand van 150 miljoen kilometer, is een aanwijzing van haar brute kracht. Zij wordt aanbeden als een god en gevreesd als een duivel, ze drijft het weer aan en helpt bij het schilderen van levendige aurora's aan de poolhemel. Haar magnetische stemmingswisselingen overspoelen het zonnestelsel met gevaarlijke straling. Vogels zingen om haar dagelijkse opkomst te begroeten, om pas te vluchten naar de veiligheid van hun nesten als zij voor de nacht vertrekt. Planten ontspruiten aan de aarde en ontvouwen hun bloemen in haar aanwezigheid. Haar oude energie wordt vrijgemaakt uit fossiele brandstoffen, terwijl systemen van zonnepanelen deze trachten te vangen door het drinken van haar licht.

Maar al is ze zo vertrouwd voor ons, en ook zo cruciaal voor bijna alles wat gebeurt op haar derde planeet, toch blijft de zon een verwarrend mysterie. Ons begrip verbeterde schoorvoetend toen tempels plaatsmaakten voor telescopen. Met name de laatste eeuw toonde vooruitgang, beginnend met een zonnewacht die een sterrenkundige visionair in Californië bouwde. Het ruimtetijdperk bracht om de aarde cirkelende telescopen en sinds de jaren negentig hebben we een armada aan gespecialiseerde zonnaruimtesondes weggezonden die onze dichtstbijzijnde ster als nooit tevoren bewaken en nauwkeurig volgen. Dankzij hun arbeid hebben we eindelijk bevestigd gekregen waar alle zonne-energie vandaan komt en hoe licht een slingerende route naar het zonneoppervlak volgt voordat het zijn weg naar de aarde vervolgt. Moderne telescopen zijn getuigen van de vorming van sterren elders in het heelal, ons tonend hoe ooit onze ster ontstond. Maar er is nog zoveel om te leren. We verkeren nog grotendeels in de duisternis als het aankomt op het verklaren van het duizelingwekkende gamma aan zonneactiviteiten. Gedurende anderhalve eeuw hebben we het aantal donkere vlekken op de zon ongeveer elke elf jaar zien toe- en afnemen, maar we kunnen nog steeds niet het tijdstip of de kracht van de volgende cyclus voorspellen. Het meest dringend is de noodzaak tot begrijpen – en voorspellen – van de technologie lamleggende sterrenexplosies die ons eeuwen terug in de tijd zouden kunnen sturen. Die herbergen de woeste kracht om satellietelektronica te laten doorbranden, elektriciteitsnetten te laten bezwijken en internationaal luchtverkeer tot stilstand te brengen. De zon heeft op het hoogtepunt van de Koude Oorlog zelfs bijna een nucleaire schermutseling veroorzaakt. De dreiging is zo ernstig dat overheden over de gehele wereld de zon nu als een vijand zien, vergelijkbaar met aardbevingen, orkanen en terrorisme. De zon zou biljoenen euro's aan schade aan onze elektrische infrastructuur kunnen toebrengen die maanden, zo niet jaren zou vergen om daarvan te herstellen.

Sterrenkundigen zijn zo wanhopig op zoek naar antwoorden dat we nu aan de vooravond staan van een nieuwe fundamentele verandering van ons begrip. Voortbordurend op eerdere successen staat een nieuwe generatie van zonneobservatoria klaar om in actie te komen. Reusachtige spiegels worden opgehesen langs de flanken van enorme vulkanen om nog preciezer naar het zonneoppervlak te staren. Ze zijn krachtig genoeg om een mens op een afstand gelijk aan de diameter van de aarde waar te nemen. Nieuwe ruimtesondes stijgen vanaf het aardoppervlak op naar de ruimte waar ze in het zonnestelsel nog dichter tot onze ster kunnen naderen dan ooit tevoren. In november 2018 brak de Parker Solar Probe het record voor nabijheid tot de zon. Uiteindelijk zal hij kruipen tot een afstand van nog geen 6 miljoen kilometer – ver binnen de omloopbaan van Mercurius – en daarbij verzengende temperaturen van meer dan 1000 graden Celsius weerstaan. Solar

Orbiter, een andere sonde, zal spoedig Venus gebruiken om geleidelijk zijn baan aan te passen en hoog boven de zon-aardelijn, de verbindingslijn tussen aarde en zon, te klimmen en vandaar een ongekende blik op de zonnepolen werpen – gebieden die cruciaal zijn voor ons begrip van de cyclische aard van de zon. In het komende decennium zullen die onverschrokken reizigers meer gegevens over de zon terugzenden dan we ooit hebben gehad. Er is nu al zoveel dat zelfs een compleet leger aan sterrentuurders de tijd ontbreekt om zich daar een weg door te banen. Wereldwijd worden kunstmatige-intelligentie-algoritmen ontwikkeld die ons moeten helpen daaruit wijs te worden.

Het is nu dus een perfect moment om tegelijkertijd zowel achteruit als vooruit te kijken, terugkerend naar een tijd waarin de zon niet meer dan een bol aan de hemel was en vooruitgaand naar hoe ons begrip een aardverschuiving kan ondergaan. Onze koers uitzettend van steentijdmonumenten naar mega-observatoria, etaleert dit boek de verbazingwekkende werkelijkheid van het leven naast een stellaire krachtbron, het laat licht schijnen op haar onthutsende raadselen en verkent de natuurkundige prestaties die onze kennis hebben zien groeien. Het is ook een zeer menselijk verhaal – een verhaal over onze vindingrijkheid en onverzadigbaar verlangen om meer te leren. Legioenen aan sterrenkundigen hebben eeuwenlang gewerkt aan het vergroten van ons begrip van de zon, waarbij velen aanzienlijke persoonlijke en beroepsmatige horden moesten nemen om bij te dragen aan wat we weten, zoals de sterrenkundigen die ontsnapten aan oorlogen om zonsverduisteringen waar te nemen, of degenen die het patriarchaat weerstonden om enorme stappen vooruit te zetten of politieke revoluties ontvluchtten om sterrenkundige revoluties te ontketenen.

Na te hebben gezien hoe de zon belandde in deze verder onopvallende uithoek van de Melkweg, zullen we een duik in de kern nemen om te leren hoe de energie van onze ster wordt gemaakt, tegen alle verwachtingen in, op een plek vol onvoorstelbaar helle vuur. Vanaf daar zullen we naar buiten vliegen, door de zonneatmosfeer, voor een korte tussenstop bij de aarde om te zien hoe sterrenkundigen proberen de dreiging van ruimteweer dat de zon op ons loslaat aan te pakken. Dan gaan we verder langs de overige planeten, om te begrijpen hoe die overleven in de woeste zonneaanval, totdat we de rand van haar invloed ver voorbij Pluto bereiken, waarna we doorreizen tot in de verdere Melkweg. Onze odyssee zal eindigen met een beschrijving van hoe de zon – de grote schenker van leven – uiteindelijk aan haar einde komt.

Maar onze reis begint bij het terugkijken naar hoe ons begrip zich ontwikkelde vanuit het bijgeloof uit het verleden naar de wetenschap van nu.

Hoofdstuk 1

VAN BIJGELOOF NAAR WETENSCHAP

'De zon, met al die planeten die om haar heen draaien en van haar afhankelijk zijn, kan nog steeds een tros druiven doen rijpen alsof zij niets anders te doen heeft in het heelal.'

Galileo Galilei

De Italiaanse natuurkundige, sterrenkundige, wiskundige en filosoof Galileo Galilei (1564-1642) bestudeerde, geïnspireerd door de uitvinding van de telescoop door Hans Lippershey, vanaf 1610 nauwgezet de nachtelijke hemel met zijn zelf gebouwde kijker. Zijn verdediging van het copernicaanse heliocentrische wereldbeeld stuitte vanaf 1612 op verzet vanuit de Rooms-Katholieke Kerk.



De twee heuvels die uittorenen boven de oude vesting van Sacsayhuamán aan de rand van de Peruviaanse stad Cuzco zijn stampvol. De inwoners verdringen elkaar om een glimp van de gebeurtenissen onder hen te zien. Velen komen al in de vroege uurtjes, in de hoop zich van een mooie plek te verzekeren. Toeristen betalen doorgaans voor een plaats op de tribune te midden van de gebeurtenissen, waarvoor ze bedragen van meer dan 100 dollar neertellen. In de omliggende straten staat de menigte zes rijen diep langs de zijkant opgesteld. Het is 24 juni, en iedereen is hiernaartoe gekomen voor het vieren van de oude Incatraditie van Inti Raymi – het festival van de zon. Deze eerbiedwaardige stad – de oude hoofdstad van het Incarijk – komt langzaam tot stilstand op deze speciale dag waarop kleurrijke optochten en festiviteiten de plaats innemen van het normale rumoer van het verkeer. Vijfhonderd dansers, acteurs en muzikanten worden ingehuurd om de menigte te vermaken. De organisatoren beweren dat dit het grootste festival in Zuid-Amerika is na het carnaval van Rio de Janeiro.

De gebeurtenissen van vandaag zijn een moderne, uitgekledede reïncarnatie van een viering die in 1412 begon om hier op het zuidelijk halfrond de winterzonnepunt te vieren, de kortste dag van het jaar. Deze dag markeert ook het begin van de nieuwjaarsviering van de Inca's. Van al hun goden is de zonnegod, Inti, voor hen de heiligste. De winterzonnepunt markeert volgens hen de grootste afstand tot de aarde en de Inca's deden alles wat ze konden om hem weer terug te lokken, om hen het komende jaar weer te verlichten en te onderhouden. Het oorspronkelijke festival duurde negen dagen, met een verzameling van prinses, priesters en generaals uitgedost in hun fraaiste kledij om te paraderen en te aanbidden. De gemummificeerde overblijfselen van Inca-voorouders werden van hun rustplekken in nabije tempels en tomben verwijderd, met stof omwikkeld, en op versierde zetels door de straten gedragen. Gouden kelken met chicha, een alcoholische drank die vaak van gefermenteerde maïs is gemaakt, werden geheven om een dronk op Inti uit te brengen. Honderden lama's werden in zijn naam geofferd in de Corichanca-tempel, met rivieren van bloed stromend door de omliggende straten (met opzet in oost-westrichting aangelegd zodat ze in lijn staan met de zonsopkomst tijdens de winterzonnepunt). De inwendige organen van de dieren werden dan nageplozen op voortekenen van toekomstige gebeurtenissen, vergelijkbaar met het lezen van theebladeren. Het ritueel ombrengen van kinderen kwam ook voor. Dit weerspiegelt een vergelijkbare Aztekentraditie waarbij krijgsgevangenen werden geslacht om zich ervan te verzekeren dat de zon haar kracht en pad langs de hemel behield. De huidige vieringen hebben een ietwat bescheidener omvang, waarbij slechts een enkele lama aan de hemelen wordt geofferd, maar het kleurrijke spektakel is er nog steeds.

Deze prachtige viering van Inti Raymi is slechts een voorbeeld van de mate waarin wij mensen de zon hebben aanbeden gedurende onze geschiedenis. In het hindoeïsme is de zon de god Surya. Hij wordt vaak afgebeeld rijdend op een wagen die wordt getrokken door zeven paarden, elk voor een andere kleur van de regenboog. De rode kleur van de zonsopkomst en de zonsondergang is in feite Aruna, de wagenman van Surya. In de Chinese mythologie is de zon de enige overlevende van tien broers die ooit samen aan de hemel schenen. Zij bleken veel te heet voor de mensen op de aarde, en daarom schoot de held Hou Yi negen van hen met pijl en boog neer. In Engeland werd de beroemde neolithische kring van Stonehenge gebouwd rond 2500 v.Chr. De reusachtige stenen staan uitgelijnd met de zonsopkomst op de zomerzonnepunt en de zonsondergang tijdens de winterzonnepunt. Vergelijkbare steencirkels uitgelijnd met de zon kunnen worden gevonden in Nabta en Karnak in Egypte. Evenzo werd de tempel van Ramses II bij Aboe Simbel zo gebouwd dat de zon het gelaat van het faraobeeld elk jaar op 22 februari en 22 oktober verlicht – de dagen van respectievelijk zijn kroning en zijn geboortedag. De beroemde piramiden van Gizeh



El Castillo (Het Kasteel) is de bijnaam voor de tempel van Kukulcán, de Gevederde Slang, die de grootste tempel in Chichén Itzá is.

zijn bijna perfect georiënteerd langs de windstreken van het kompas, waarbij vele onderzoekers uiteenlopende verklaringen bieden voor hoe de oude Egyptenaren dat voor elkaar hebben gekregen. Sommigen veronderstellen dat de positie van de zon tijdens het herfstpunt of de dag-nachtevening in het najaar de Egyptische bouwkundigen hielp met de juiste uitlijning. Voor de oude Egyptenaren was de zon de met een valkenkop uitgeruste god Ra, die dagelijks in een van zijn twee boten van oost naar west langs de hemel reisde. Elke nacht zou Ra zich begeven in de onderwereld, waar de opstandige slangendemon Apophis zou proberen hem de doorgang te belemmeren. De zon zou de volgende dag slechts weer opkomen als Ra met succes die tweestrijd won. Dat lukte natuurlijk altijd.

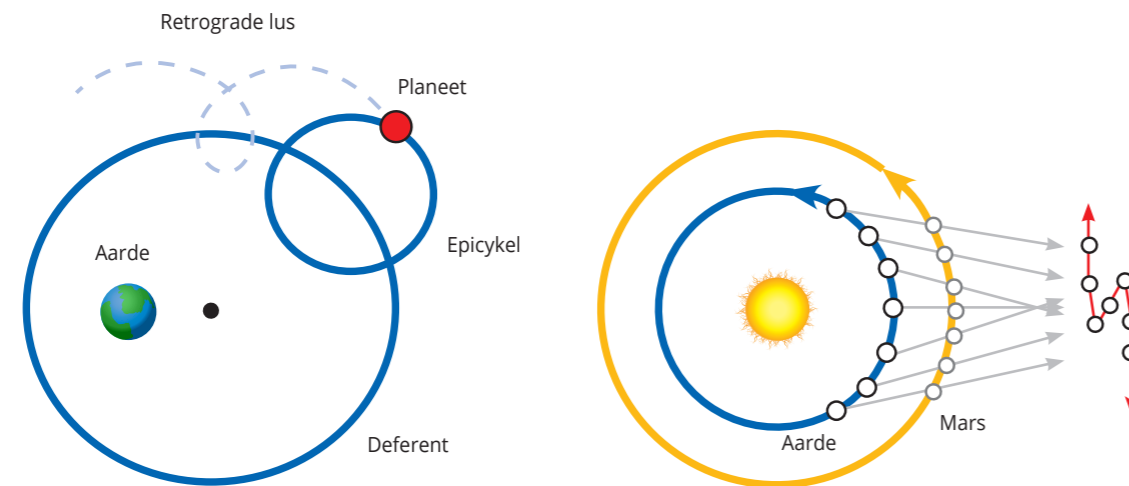
Piramiden en slangen verschijnen ook in andere zonnepunt wereldwijd. Terugkerend naar de Amerikaanse continenten, meer dan 4000 kilometer ten noordwesten van Cuzco, trekken de oude Maya-tempels in Chichén Itzá jaarlijks meer dan 2,5 miljoen bezoekers naar het Mexicaanse schiereiland Yucatán. Centraal in dit architectonische wonderland ligt de tempel van Kukulcán, ook wel bekend als El Castillo (Het Kasteel). Het is een trappenpiramide die tussen 900 en 1000 n.Chr. is voltooid. Rondom de vier zijden bestaat die uit precies 365 treden – een voor elke dag van het jaar. Tijdens de dag-nachtevening in de lente en de herfst – als de dag en de nacht voor iedereen op aarde een gelijke lengte hebben – zorgt de hoek waarin de zon staat ervoor dat de schaduwen die de treden werpen lijken op de gevederde slangengod Kukulcán die afdaalt langs de zijkant van de piramide. Het spektakel duurt slechts 45 minuten. Toepasselijk geplaatste stenen beeldhouwwerken van een slangenkop versterken de illusie.

Het is duidelijk dat de Maya's verwoede hemelwaarnemers waren, want veel van de andere tempels op het complex zijn gewijd aan bewegingen langs de hemel. De nabije structuur El Caracol – bijgenaamd De Sterrenwacht maar ook wel als Het Slakkenhuis aangeduid – was zo gebouwd dat de planeet Venus elke acht jaar door een opening verschijnt.

Heliocentrisme

De komst van de katholieke Spaanse conquistadores in Midden- en Zuid-Amerika aan het begin van de zestiende eeuw maakte een eind aan een groot deel van de lokale zonsaanbedding. Inti Raymi werd verboden, zodat het laatste oorspronkelijke Inca-festival in 1535 in Cuzco werd gevierd. Het werd pas in 1944 nieuw leven ingeblazen. Slechts drie jaar voor zijn afschaffing broeide er een andere revolutie op het thuiscontinent van de conquistadores, Europa. De Poolse wiskundige Nicolaas Copernicus had zojuist een eerste versie voltooid van een zeer omstreden boek waaraan hij zestien jaar had gewerkt. De inhoud was zo opriemend dat hij het jarenlang liet rusten. Het boek, *De revolutionibus orbium coelestium* (Over de omwentelingen der hemellichamen) zou pas vlak voor Copernicus' overlijden in 1543 verschijnen. De publicatie markeerde het begin van onze overgang van het bijgeloof in het verleden naar een moderne, wetenschappelijke kijk op de zon door te veronderstellen dat zij zich in het centrum van het zonnestelsel bevindt.

Dat wil echter niet zeggen dat mensen niet eerder op een kritische manier naar de zon waren gaan kijken. Chinese sterrenkundigen bemerkten al rond 800 v.Chr. de aanwezigheid van donkere vlekken op het oppervlak van de zon. Ze legden die zonnevlekken rond tweeduizend jaar geleden stelselmatig vast, maar gebruikten ze om onheilspellende gebeurtenissen te voorspellen. In 807 zag een benedictijner monnik genaamd Adelmus een vergelijkbare oneffenheid die meer dan een week aanhield. Meer zonnevlekken verschenen er rondom de sterfdag van Karel de Grote, de keizer van het Heilige Roomse



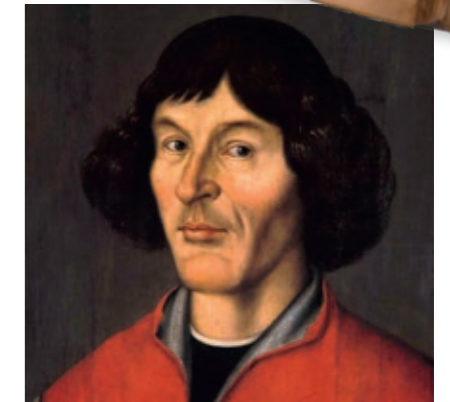
De geocentrische (links) en heliocentrische (rechts) verklaringen voor waarom we vaak zien dat een planeet aan de nachtelijke hemel van richting lijkt te veranderen.

Rijk, in 814. Dat die ook als een voorteken werden gezien en verband zouden houden met zijn verscheiden, onderstreept het feit dat we nog geen afstand hadden genomen van een bijgelovige kijk op onze dichtstbijzijnde ster. Op zaterdag 8 december 1128 tekende de Engelse monnik Jan van Worcester de oudste nog bestaande schets van een zonnevlek.

Die waarnemingen werden alle gedaan met het blote oog, zeer waarschijnlijk wanneer het felle schijnsel van de zon door wolken werd verzwakt. De maan bedekt ook met enige regelmaat de zon, tijdens zonsverduisteringen, en onze voorouders lieten geen tijd verloren gaan om op die momenten een nauwkeuriger blik te werpen. De Griekse filosoof Plutarchus bekeek een zonsverduistering in detail, en stelde vast dat 'een soort licht zichtbaar is rondom de rand die verhindert dat de schaduw diepgrondig en absoluut wordt'. Op 22 december 968 was er een zonsverduistering zichtbaar in Constantinopel, nu de Turkse stad Istanboel. De achttien jaar oude Leo Diaconus schreef: 'Het was mogelijk om de schijf van de zon te zien, dof en niet brandend, en een zwakke en onbeduidende gloed als een dunne ring schijnend in een cirkel rondom de rand van de schijf.' Beide mannen zagen de buitenste laag van de zon, de corona, voor de eerste keer. Zonsverduisteringen verschaften ons ook onze eerste blik op de protuberansen – vlamachtige uitbarstingen gezien langs de rand van de zon. De Russische *Kroniek van Novgorod* beschrijft de zonsverduistering van 1 mei 1185: 'De zon werd gelijkaardig in haar verschijning als de maan en vanuit haar hoornen verscheen iets dat leek op levende sintels.'

Ondanks die vroege waarnemingen bleef een hardnekkig beeld populair: dat de zon bewoog rondom de aarde. Het was dit idee waartegen Copernicus zich op zo befaamde wijze verzette en waarom het hem en zijn groeiende groep van volgelingen – de copernicanen – vaak te heet onder de voeten werd. Hij beweerde het tegengestelde – dat de aarde niet meer dan nog een planeet is die rondom de centrale zon draait. Dat geloof wordt heliocentrisme genoemd. Copernicus had geen bewijs dat dit inderdaad waar was, maar hij zag het als een veel eenvoudiger stelsel dan datgene wat sinds de dagen van het oude Griekenland in zwang was. De Griekse universele wetenschapper Ptolemaeus was een gedreven voorstander van het geocentrisme – de aarde bevindt zich in het hart van alles, met de rest van het heelal in haar kielzog. Ptolemaeus opperde dat onze planeet is omgeven door een stel concentrische schillen, elk een hemellichaam herbergend, die rondom de aarde draaien. Maar daarbij stuitte hij op een probleem met de andere planeten.

Veel oude beschavingen, van de Egyptenaren tot de Maya's in Chichén Itzá, volgden de planeten terwijl ze langs de hemel bewogen. Ze bemerkten een eigenaardigheid in hun gedrag – vaak leek het alsof een planeet stilhield om daarna in de tegengestelde richting te gaan bewegen. Wat kon ervoor zorgen dat een van Ptolemaeus' hemelbollen plotseling tot stilstand kwam en rechtsomkeert maakte?



Boven: Het werk *De revolutionibus orbium coelestium* werd gepubliceerd vlak voordat de auteur, de Poolse priester Nicolaus Copernicus (1473-1543), stierf. Deze uitgave vormt een mijlpaal in de wetenschapsgeschiedenis. Copernicus voert bewijzen aan tegen de geocentrische visie van Claudius Ptolemaeus (85-ca. 150) en plaatst de zon in het middelpunt. In 1616 belandde het werk op de lijst van verboden literatuur, de Index.

Onder: Een portret in het gemeentehuis van de Poolse stad Toruń, uit 1580, toont de beroemde kanunnik Copernicus.

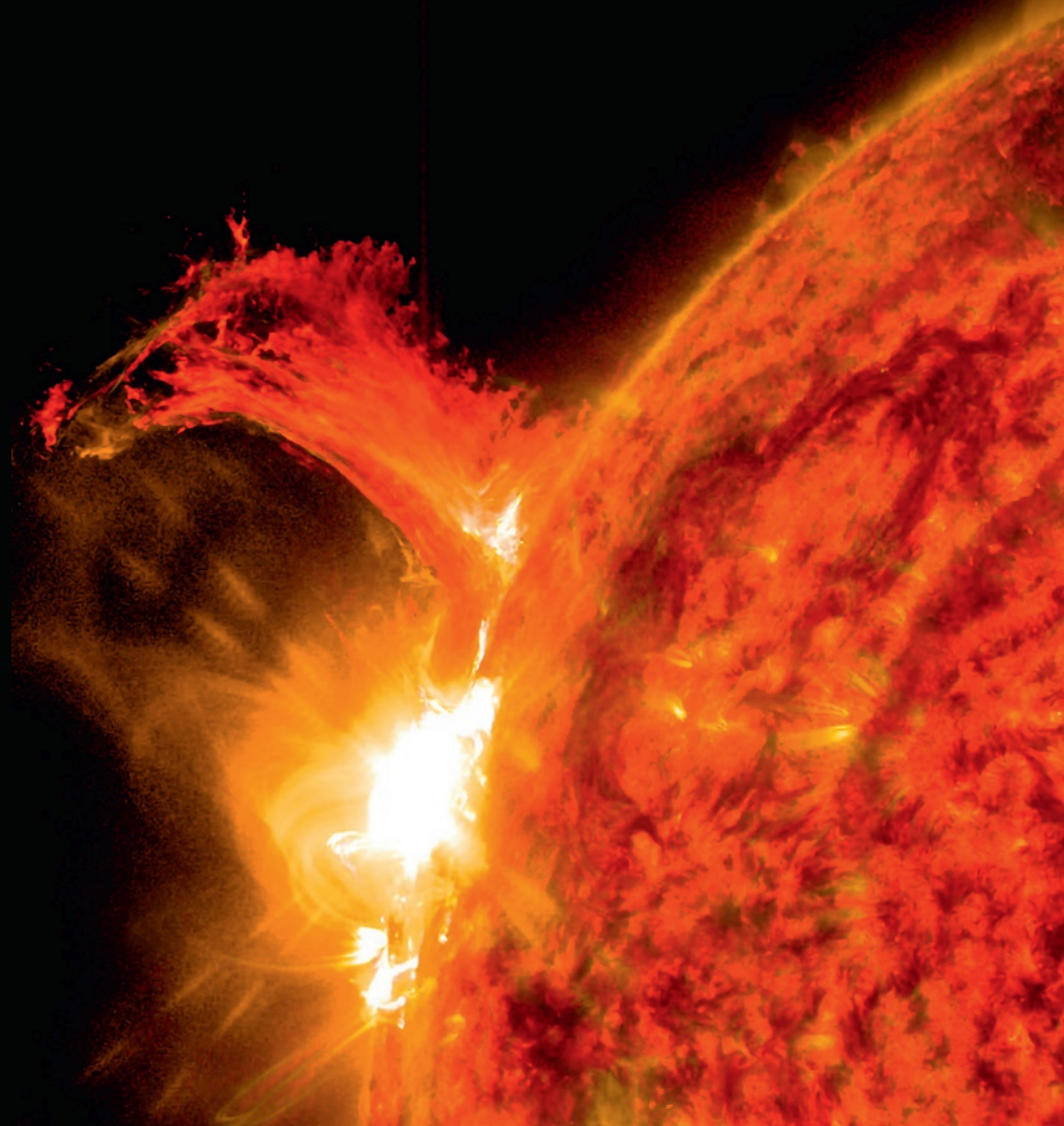
Hoofdstuk 7

STERRENEXPLOSIES

'De warmte en het licht van de zon zijn zo intens dat bijzondere instrumenten en methoden noodzakelijk zijn voor waarneming van haar oppervlak.'

Charles Young

De satelliet SDO van NASA maakte op 2 oktober 2014 deze opname van een zonnevlam, de heldere lichtflits. Zonnemateriaal barst daaronder uit naar de ruimte.





De 40-meter-radiotelescoop OVRO in Big Pine, Californië, een prototype voor een project dat uit acht telescopen zou moeten bestaan, werd in 1968 voltooid.

Een prachtige rit van vijf uur ten noorden van Mount Wilson laat je slingeren tussen het Sequoia National Forest en Death Valley National Park. Tegen de tijd dat je de dorpjes Independence en Lone Pine bereikt, bevind je je tussen de torenhoge groene bergwouden in het westen en de poort naar de gortdroge Mojavewoestijn in het oosten. Uiteindelijk kom je aan bij Owens Valley Radio Observatory, een reeks reusachtige radioschotels gebouwd op een stuk verlaten land vol struikgewas. De hoge bergen aan weerszijden blokkeren de verstoring door lokale radiosignalen. Niet dat er daar veel van zijn.

Toen Los Angeles zich aan het eind van de negentiende eeuw uitbreidde, had de groeiende bevolking van die stad behoefte aan meer water. In 1913 werd een aquaduct met een lengte van 375 kilometer voltooid, en dat leidde water van Owens Valley naar de ontluikende metropool. Plaatselijke veehouders en boeren waren woedend, maar het project kreeg uiteindelijk toestemming van president Roosevelt zelf. De vallei droogde op en vrijwel iedereen trok weg. In de jaren vijftig arriveerden sterrenkundigen van Caltech die er een sterrenwacht oprichtten om radiogolven te bestuderen die door een scala aan hemellichamen werden uitgezonden. Op dezelfde plek bevindt zich de Owens Valley Solar Array – een

experiment dat gewijd is aan uitsluitend luisteren naar de zon. Nu beheerd door het New Jersey Institute of Technology (NJIT), is het recent enorm uitgebreid, waarbij het aantal antennes werd verdubbeld. De wereldwijd leidende faciliteit is omgedoopt tot Expanded Owens Valley Solar Array (EOVSA) en sterrenkundigen gebruiken die om onze meest nabije ster met ongekende precisie te bestuderen. De opgevoerde schotels kwamen in april 2017 online, en nog geen halfjaar later kwam er een enorm actief gebied langs de westelijke zijde van de zon aanrollen. Tussen 6 en 10 september leverde dat de krachtigste zonnevlammen die tijdens Cyclus 24 zijn gezien. EOVSA keek ernaar, evenals een ruimtevlott aan zonneobservatoria, waaronder NASA's SDO.

Wilde vlammen

Een zonnevlam is een reusachtige, plotselinge afgifte van zonne-energie, en de eerste die er een waarnam was Richard Carrington, in 1859. Tijdens een zonnevlam wordt de zon op een klein, lokaal gebied snel feller. Er wordt snel energie uitgestoten in alle delen van het elektromagnetisch spectrum, van radiogolven tot aan gammastralen. De aardatmosfeer voorkomt dat een deel van die straling het aardoppervlak bereikt, dus hebben we zowel faciliteiten zoals EOVSA op aarde als ruimtetelescopen zoals SDO nodig om het volledige bereik aan energie dat zonnevlammen afgeven te bestuderen. Binnen tien minuten kan een zonnevlam tien miljoen maal meer energie laten vrijkomen dan een vulkaanuitbarsting en duizendmaal meer energie dan de meest verwoestende aardbevingen. Sommige van de zonnevlammen in september 2017 explodeerden met de kracht van een miljard waterstofbommen. Als we op een of andere manier hun vermogen aan de bron zouden kunnen temmen, dan zouden we voldoende energie hebben om het menselijk ras met de huidige verbruikssnelheid de volgende 10.000 jaar te onderhouden. Maar zelfs de meest woeste zonnevlam beslaat nog niet één procent van de gehele zonneschijf. Zonnevlammen worden ingedeeld naar hun vermogen, beginnend met de zeer zwakke A-klasse, gevolgd door B, C en M, en uiteindelijk de meest woeste zonnevlammen van de X-klasse. Elke klasse is tienmaal krachtiger dan de vorige, zodat een zonnevlam van de X-klasse honderdduizendmaal krachtiger is dan een A-klasse-gebeurtenis. Elke categorie is ook nog eens verdeeld in tien kleinere subklassen, behalve de X-categorie, die kent geen bovenlimiet. Het vierdaagse spervuur in september 2017 leverde 27 zonnevlammen van de M-klasse en vier van de X-klasse op. Zonnevlammen zijn vaak verbonden met actieve gebieden en hun aantal groeit en krimpt op een manier die doet denken aan de zonnevlekcyclus. Rondom het zonnemaximum kunnen er dagelijks tientallen zonnevlammen losbarsten, maar bij het zonneminimum kunnen er weken verstrijken zonder dat de zon een enkele zonnevlam heeft. Sterrenkundigen weten sinds de jaren zestig dat de piek van zonnevlamactiviteit een paar jaar na het zonnevlekmaximum voorkomt, maar ze weten nog steeds niet waarom dat zo is. Evenmin is duidelijk waarom de grootste zonnevlamgebeurtenissen zich vaak ontplooiën als de zon anderszins zeer rustig is. De zonnevlammen van september 2017 waren de krachtigste sinds 2006, maar barstten uit aan het eind van de buitengewoon zwakke Cyclus 24. De reusachtige zonnevlam waarvan Carrington in 1859 getuige was – nog steeds een van de grootste die zijn beschreven – verscheen tijdens een eerdere nogal matte zonnevlekkencyclus.

De zonneatmosfeer

Wat we weten, is dat deze explosieve gebeurtenissen hun wortels hebben in de zonneatmosfeer, die bestaat uit drie lagen: de fotosfeer, de chromosfeer en de corona. De chromosfeer is een dun gebied dat zich uitstrekt tot een paar duizend kilometer boven de fotosfeer. Gezien als een dieprode rand rond