

Het aanleggen van een catalogus van  
zonnevlammen op basis van GOES-metingen.

# Inhoudsopgave

<b>Dankwoord</b>	<b>v</b>
<b>Voorwoord</b>	<b>vi</b>
<b>1 Inleiding</b>	<b>1</b>
1.1 De zon . . . . .	1
1.2 De corona van de zon . . . . .	2
1.2.1 De atmosfeer . . . . .	2
1.2.2 Zonnevlekken . . . . .	3
1.2.3 Zonnevlammen . . . . .	6
1.2.4 Solar Energetic Particle event (SEP-event) . . . . .	12
1.2.5 Ruimteweer . . . . .	13
1.2.6 Observeren van de zon vanuit de ruimte . . . . .	14
<b>2 Catalogi, de GOES-satellieten en detectiemethodes.</b>	<b>16</b>
2.1 Catalogi . . . . .	16
2.1.1 Korte bespreking van enkele bestaande catalogi . . . . .	16
2.1.2 De SEC-catalogus . . . . .	17
2.2 Geostationary Operational Environmental Satellite (GOES) . . . . .	20
2.2.1 De XRS . . . . .	21
2.3 GOES-10 en GOES-12 . . . . .	22
2.4 Twee verschillende methodes om zonnevlammen automatisch te detecteren . . . . .	23
2.4.1 Eerste methode . . . . .	23
2.4.2 Tweede methode . . . . .	23
2.4.3 IDL en SSWIDL . . . . .	24
2.5 Onze catalogus . . . . .	25
<b>3 Resultaten</b>	<b>27</b>
3.1 Verbeteren van de tweede methode . . . . .	27
3.2 Gedetailleerde vergelijking van de twee catalogi . . . . .	31

3.2.1	De algemene verschillen tussen de twee catalogi . . . .	31
3.2.2	Het verschil in peaktijden en duur van de gemeenschap- pelijke zonnevlammen . . . . .	34
3.2.3	Overzicht van de verschillen . . . . .	42
<b>4</b>	<b>De temperatuursafhankelijk- heid van SEP-events</b>	<b>44</b>
4.1	Detectie van SEP-events door het SEC . . . . .	44
4.2	De temperatuur van een zonnevlam . . . . .	46
4.3	De temperatuursafhankelijkheid van SEP-events . . . . .	48
4.3.1	Eerder bekomen resultaten . . . . .	48
4.3.2	Onze resultaten . . . . .	49
	<b>Besluit</b>	<b>52</b>
	<b>Bibliografie</b>	<b>54</b>

# Lijst van figuren

1.1	De structuur van de zon. . . . .	2
1.2	De fotosfeer. . . . .	4
1.3	De chromosfeer. . . . .	4
1.4	De corona. . . . .	5
1.5	Het temperatuurverloop van de zon. . . . .	5
1.6	Een zonnevlek. . . . .	6
1.7	De aardatmosfeer. . . . .	7
1.8	Een zonnevlam in verschillende golflengten. . . . .	8
1.9	Magnetische reconnectie. . . . .	9
1.10	Oktober 2003. . . . .	11
2.1	Onze catalogus. . . . .	26
3.1	Tweevoudige X-zonnevlam. . . . .	28
3.2	M- en C-zonnevlam op 7 juni 2003. . . . .	29
3.3	Drievoudige X-zonnevlam. . . . .	30
3.4	3 juni 2003. . . . .	32
3.5	13 en 14 september 2005. . . . .	33
3.6	Detail 14 september 2005. . . . .	35
3.7	Vergelijking van de piektijden. . . . .	36
3.8	Vergelijking van het verschil van de piektijden. . . . .	37
3.9	Vergelijking duur van de zonnevlammen met 20% en 9%. . . . .	39
3.10	Verdeling van de duur van onze zonnevlammen. . . . .	40
3.11	Verdeling van de duur van de SEC-zonnevlammen. . . . .	41
4.1	SEP-event. . . . .	45
4.2	Spectra van een zwarte straler. . . . .	47
4.3	Temperatuur van SEP-zonnevlammen en gewone zonnevlammen. . . . .	51

# Lijst van tabellen

1.1	X-stralen classificatie. . . . .	10
1.2	De sterkte. . . . .	11
1.3	De helderheid. . . . .	12
2.1	De SEC-catalogus. . . . .	19
2.2	Metingen van GOES-12. . . . .	22
3.1	Aantal zonnevlammen. . . . .	31
4.1	SEP-events van 2005. . . . .	46

# Dankwoord

Deze thesis is tot stand gekomen dankzij een samenwerking tussen het CPA (Centrum voor Plasma Astrofysica) en de afdeling zonnephysica van de Koninklijke Sterrenwacht in Ukkel, waar een groot deel van mijn onderzoek heeft plaatsgevonden.

In de eerste plaats zou ik dus graag de medewerkers van de afdeling zonnephysica willen bedanken voor hun hulp, in het bijzonder Petra Vanlommel en David Berghmans.

Daarnaast wil ik mijn promotor, Anik de Groof, danken voor het goede advies bij het schrijven van mijn thesis.

Ook mijn moeder verdient een bedanking voor het nalezen en corrigeren.

Ik wil natuurlijk de rest van mijn familie niet vergeten die mij de afgelopen vijf jaar steeds gesteund heeft.

# Voorwoord

Een zonnevlam is een zeer energetische gebeurtenis op het oppervlak van de zon. Hierbij kan er tot  $10^{25}$  Joule vrijkomen over een tijdsperiode van  $10^3$  seconden<sup>1</sup>. Deze energie komt voornamelijk vrij onder de vorm van elektromagnetische straling. Door deze straling verandert de ionosfeer van de aarde en ontstaan er problemen met radio- en telecommunicatie. Dit is één van de gevolgen van ruimteweer. Voor de mens op aarde en in de ruimte is het ook niet gezond om blootgesteld te worden aan deze straling. Daarom is het belangrijk dat we zonnevlammen kunnen voorspellen.

Een begin hiervan is het catalogeren van de gebeurtenissen en structuren op de zon. Naast zonnevlammen worden ook zonnevlekken, actieve gebieden, coronale gaten, CME's (coronale massa-uitstoten) en SEP-events (Solar Energetic Particles) geregistreerd. Aan de hand daarvan kunnen de structuren en de gebeurtenissen aan elkaar gelinkt worden. Dit kan men dan gebruiken om betere voorspellingen te maken.

Het doel van deze thesis is het automatisch detecteren van zonnevlammen. Het is natuurlijk zo dat er reeds vele catalogi bestaan. Wat is dan het nut van nog een andere catalogus? De meeste bestaande catalogi gebruiken andere metingen. Al van ongeveer 1970 worden er satellieten gelanceerd die de zon moeten observeren en metingen doen. Omdat zonnevlammen over het hele elektromagnetische spectrum uitzenden, kunnen deze metingen bij verschillende golflengten gebeuren. Daarnaast worden niet alle detecties automatisch gedaan.

Wij gebruiken de metingen die gedaan worden door de GOES-satellieten, met name GOES-10 en GOES-12. Omdat we onze catalogus willen vergelijken met een al bestaande, beperken we ons tot waarnemingen van de afgelopen drie jaar (2003-2005).

De GOES-satellieten staan onder toezicht van het NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration). Het SEC, een afdeling binnen het NOAA,

---

<sup>1</sup>Dit komt overeen met ongeveer 17 minuten.

biedt de metingen online aan samen met verschillende catalogi. Het is dan ook hun catalogus van zonnevlammen waarmee wij de onze gaan vergelijken.

In deze thesis wordt er eerst wat meer uitleg gegeven over de zon zelf, haar structuren en de verschillende gebeurtenissen op de zon. Verder leggen we uit wat ruimteweer is en geven we een summier overzicht van de geschiedenis van het observeren vanuit de ruimte. Hierbij beginnen we met de eerste GOES-satelliet (GOES-1).

In het tweede hoofdstuk beschrijven we kort enkele bestaande catalogi en uitgebreid de SEC-catalogus.

Omdat we de metingen gebruiken die door GOES-10 en GOES-12 worden gedaan, is het interessant om de geschiedenis achter deze satellieten in detail te bekijken. Verder zijn ook de instrumenten die de metingen doen belangrijk. Het is dan ook logisch dat deze besproken worden. Een volgend onderdeel in dit hoofdstuk gaat over de verschillende methodes die wij hebben gebruikt om onze catalogus op te stellen. In het laatste deel bespreken we het formaat van de door ons aangelegde catalogus.

Het derde hoofdstuk bestaat uit de vergelijking tussen de twee catalogi en de verbetering van de onze. In het vierde hoofdstuk gebruiken we dan onze catalogus om de temperatuursdistributie van zonnevlammen na te gaan. Het is namelijk zo dat elke SEP-event geassocieerd wordt met een zonnevlam. Met behulp van de metingen van de GOES-satellieten kunnen we de temperatuur van een zonnevlam bepalen. Uit onderzoek is gebleken dat zonnevlammen die gelinkt zijn aan een SEP-event een andere temperatuursdistributie hebben dan deze zonder SEP-event.



# Hoofdstuk 1

## Inleiding

### 1.1 De zon

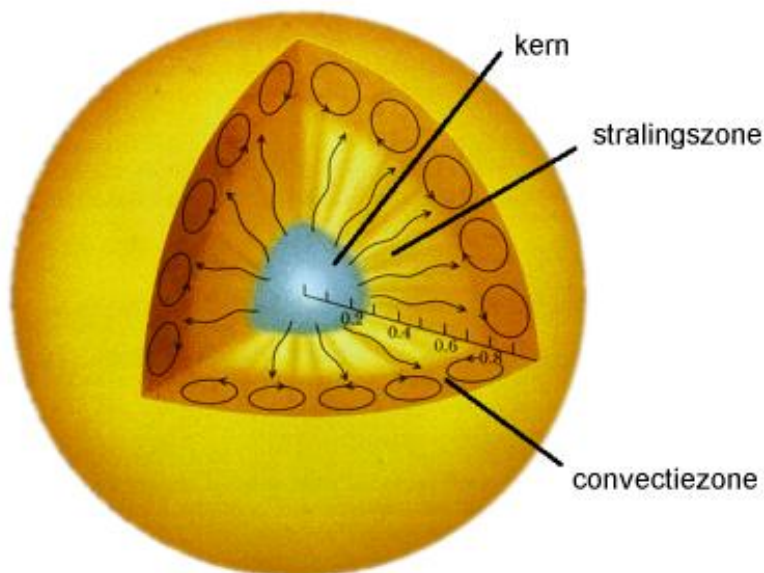
De zon is een ster van type G2, dit wil zeggen dat de zon zich op de hoofdreeks bevindt, hoofdzakelijk in geel zichtbaar licht uitzendt en een oppervlakte-temperatuur van ongeveer 5700 Kelvin heeft. Als je dit vergelijkt met de andere sterren in het heelal, is ze er een van dertien in een dozijn. Datgene wat de zon voor ons zo speciaal maakt, is dat ze de dichtstbijzijnde ster aan de hemel is. Daardoor kan zij zeer goed bestudeerd worden. Dit gebeurt al van in de oudheid.

Naast vast, vloeibaar en gasvormig bestaat er nog een vierde toestand van materie: plasma. Plasma is een geïoniseerd neutraal gas waarvan de deeltjes collectief gedrag vertonen. Dit is de meest voorkomende toestand in het heelal. Net als alle andere sterren is de zon een bol plasma. De zon heeft een massa van  $1.989 \times 10^{30}$  kg en een straal van  $6.9598 \times 10^8$  m.

De kern van de zon gaat van het centrum tot ongeveer 20% van de straal. Enkel in dit deel van de zon is de temperatuur hoog genoeg en de dichtheid groot genoeg opdat er kernfusie kan plaatsvinden. Om exact te zijn: de dichtheid is om en bij de  $150000 \text{ kg/m}^3$ , de temperatuur ongeveer 15 miljoen Kelvin.

Bij kernfusie worden twee lichte atoomkernen samengesmolten tot een zwaardere atoomkern. Tijdens dit proces wordt er massa omgezet in energie, want de som van de massa's van de twee lichtere atoomkernen is groter dan de massa van het eindresultaat. Deze energie moet afgevoerd worden naar het oppervlak van de zon. Dit gebeurt op twee manieren: in de stralingszone (0.2 keer de straal van de zon tot 0.7 keer de straal) door straling en in de convectiezone (0.7 keer de straal tot het oppervlak) door convectie (zie

figuur 1.1). In de convectiezone is de opaciteit<sup>1</sup> te groot om de energie via straling naar buiten te leiden. Convectie is te vergelijken met een kokende brij: hete gasbellen stijgen naar het oppervlak waar ze hun warmte afgeven en zakken daarna opnieuw naar beneden om terug op te warmen.



Figuur 1.1: De structuur van het binnenste van de zon: de kern, de stralingszone en de convectiezone.

## 1.2 De corona van de zon

### 1.2.1 De atmosfeer

De atmosfeer van de zon bestaat uit drie delen: de fotosfeer (figuur 1.2), de chromosfeer (figuur 1.3) en de corona (figuur 1.4). De fotosfeer wordt ook het oppervlak van de zon genoemd omdat we deze vanop aarde met het blote oog kunnen zien. De chromosfeer en de corona zenden veel minder sterk uit in het zichtbare licht en worden dus overtroffen door de fotosfeer. Ze zijn enkel zichtbaar vanop aarde tijdens een zonsverduistering of met een coronagraaf. Een coronagraaf hanteert hetzelfde principe als bij een zonsverduistering: een ronde schijf wordt voor de zon gehouden zodat het zichtbare licht van de

<sup>1</sup>De opaciteit is een maat voor de ondoorlatendheid voor straling.

fotosfeer wordt geblokkeerd. We zien zo alleen de omliggende chromosfeer en de corona.

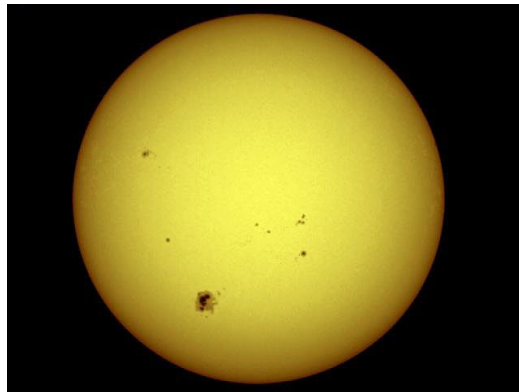
De chromosfeer is een laag van enkele duizenden kilometers dik die warmer is dan de fotosfeer. De corona is een zeer ijle laag die zich zeer ver uitstrekt, tot voorbij de baan van de aarde. Tussen de corona en de chromosfeer is er de transitie laag waarin de temperatuur spectaculair stijgt. De corona heeft een gemiddelde temperatuur van rond de 2 miljoen Kelvin en is dus veel heter dan de fotosfeer, waar de temperatuur ongeveer 5700 Kelvin bedraagt (zie figuur 1.5).

Omdat de corona een zeer ijle laag is, is er niet veel straling nodig om deze op te warmen. In de kern van de zon wordt er door kernfusie genoeg straling geproduceerd om dit te doen. Men neemt aan dat de energie die voor de opwarming van de corona zorgt afkomstig is uit de convectiezone van de zon. Maar hoe wordt deze energie getransporteerd en omgezet van kinetische energie in warmte? Volgens Ulmschneider (1996) zijn de transportmechanismen onder te verdelen in twee categorieën: hydrodynamische verhittingsmechanismen en magnetische. Dit zijn de belangrijkste verhittingsmechanismen. Onder hydrodynamische verhittingsmechanismen verstaat men verwarming door akoestische golven. Uit ruimtemetingen is echter duidelijk geworden dat akoestische golven enkel verantwoordelijk kunnen zijn voor de lichte opwarming van de chromosfeer. Daarenboven worden de meeste geluidsgolven naar de kern gereflecteerd omdat de dichtheid van de chromosfeer en corona te laag is. Akoestische golven hebben een medium nodig om zich voort te planten. Het zijn dus de magnetische verhittingsmechanismen die verantwoordelijk zijn voor het grootste deel van de opwarming van de corona.

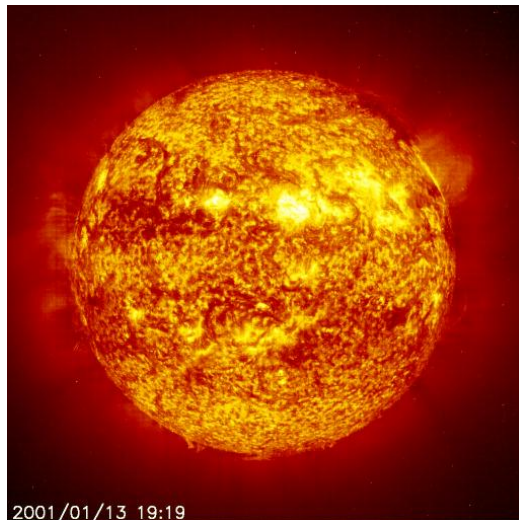
Door de bewegingen van de voetpunten van de magnetische veldlijnen in de fotosfeer wordt de mechanische energie van de convectieve bewegingen omgezet in magnetische energie. Deze magnetische energie komt voor in vorm van magnetische of magneto-akoestische golven. De magnetische golven worden Alfvéngolven genoemd en de magneto-akoestische golven bestaan uit twee soorten: de snelle en de trage golf. Deze drie soorten van golven vormen samen met magnetische reconnectie de belangrijkste magnetische verhittingsmechanismen. Er wordt nog steeds onderzoek gedaan naar de manier waarop de corona verhit wordt.

### 1.2.2 Zonnevlekken

De zon heeft een cyclus van gemiddeld 11 jaar waarin ze van een weinig actieve periode (zonneminimum) naar een zeer actieve periode (zonnemaximum) gaat, om daarna terug naar een zonneminimum te evolueren. Tij-



Figuur 1.2: De fotosfeer. De donkere plekken op het oppervlak zijn zonnevlekken.



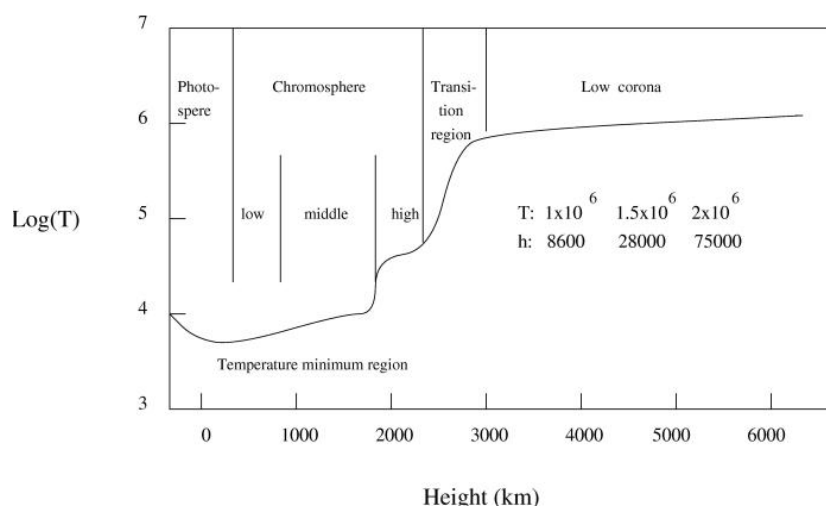
Figuur 1.3: De chromosfeer waargenomen bij 587.6 nm, een golflengte uitgezonden door He.

dens het zonnemaximum draait het hoofdmagneetveld van de zon om (de magnetische noordpool wordt de magnetische zuidpool en omgekeerd). Het laatste zonnemaximum was in 2001 en dus evolueert de zon naar een zonneminimum dat eind volgend jaar of begin 2008 zal worden bereikt. Daarna zal de activiteit van de zon terug toenemen. Momenteel zitten we in de eindfase van de 23ste zonnecyclus. De eerste zonnecyclus liep van 1755 tot 1766.

De zon heeft een zeer ingewikkeld magneetveld dat regelmatig verandert. Het globale magneetveld van de zon kan, tijdens een zonneminimum, als een



Figuur 1.4: De corona gefotografeerd tijdens een zonsverduistering. De rode vlekjes aan de rand van de zon zijn afkomstig van de  $H\alpha$ -overgang in de chromosfeer.



Figuur 1.5: Het temperatuurverloop doorheen de fotosfeer, de chromosfeer en de corona.

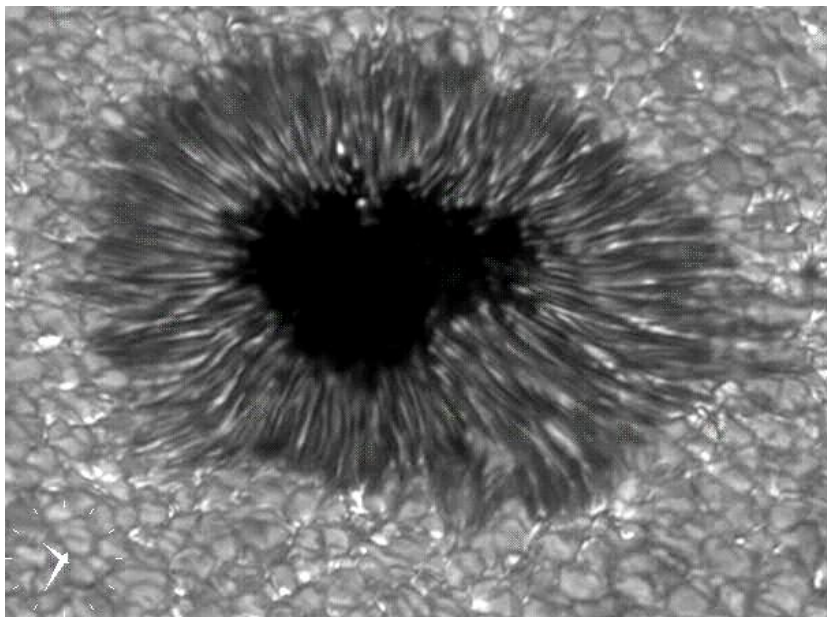
dipool gezien worden.

Omdat op verschillende breedtegraden op het zonneoppervlak de rotatiesnelheid verschillend is - een punt op de equator draait in 25 dagen rond terwijl een punt in de buurt van een pool 30 dagen of meer nodig heeft - draaien de magnetische veldlijnen in elkaar en ontstaan er bijkomende magnetevelden. Het verschil in rotatiesnelheid wordt differentiële rotatie genoemd.

Op de plaatsen waar er een hoge concentratie aan magnetische veldlijnen is, dus een sterk magnetveld, kan de hitte uit de kern niet goed naar

buiten getransporteerd worden. De magnetische veldlijnen werken de convectie tegen. Deze plaatsen hebben een lagere temperatuur en worden zonnevlekken genoemd (zie figuur 1.6). De temperatuur van een zonnevlek is ongeveer 1000 tot 1500 graden lager dan de rest van de fotosfeer. Ze zijn op de fotosfeer te herkennen als donkere vlekken. Omdat zonnevlekken duiden op een magneetveld, hebben ze steeds een polariteit, ze zijn een magnetische noordpool of zuidpool.

Het aantal zonnevlekken karakteriseert de zonneactiviteit, hoe meer zonnevlekken, hoe actiever de zon.



Figuur 1.6: Een zonnevlek in zichtbaar licht op de fotosfeer.

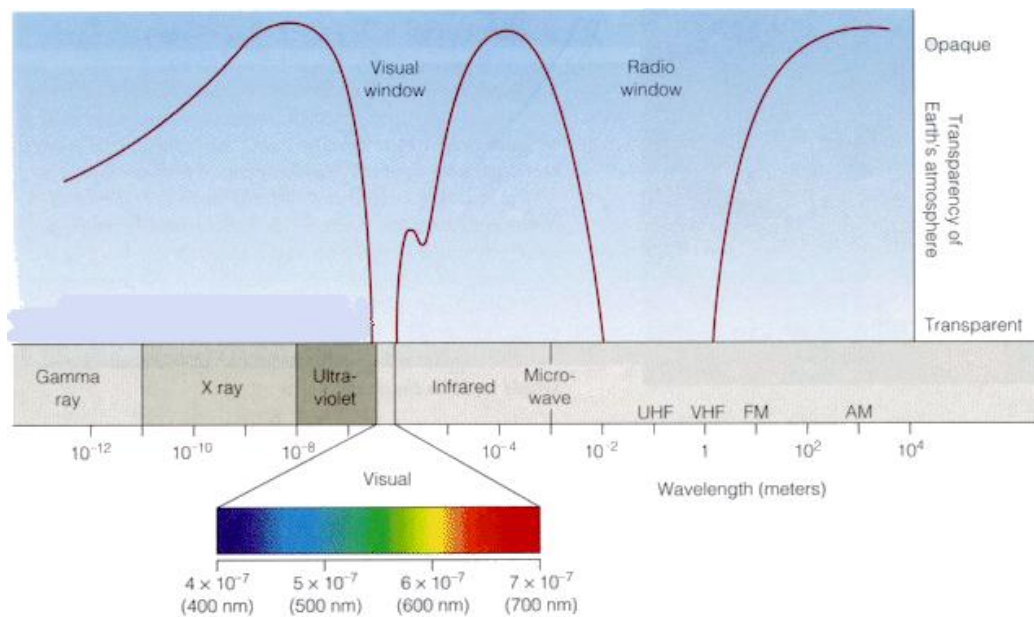
### 1.2.3 Zonnevlammen

Een zonnevlam is het plots vrijkomen van opgeslagen magnetische energie. Tijdens zo'n uitbarsting kan er tot  $10^{25}$  Joule vrijkomen in een tijdsperiode van  $10^3$  seconden. Hierbij wordt er straling over het hele elektromagnetische spectrum uitgezonden. Een zonnevlam kan dus in verschillende golflengten waargenomen worden.

De eerste waarneming van een zonnevlam die gerapporteerd werd in de astronomische literatuur dateert van 1 september 1859. Deze zonnevlam werd waargenomen in zichtbaar licht door twee wetenschappers, R. C. Carrington en R. Hodgson, afzonderlijk van elkaar.

Vanop aarde is het enkel mogelijk een zonnevlam waar te nemen in zichtbaar licht omdat de aardatmosfeer alleen zichtbaar licht, radiogolven en een klein stukje van de ultraviolette straling (UV) doorlaat. Alle andere straling wordt gedeeltelijk of helemaal geabsorbeerd door de atmosfeer (zie figuur 1.7).

Als we dus een zonnevlam willen waarnemen in  $\gamma$ -straling of X-straling, dan moeten we vanuit de ruimte observeren.



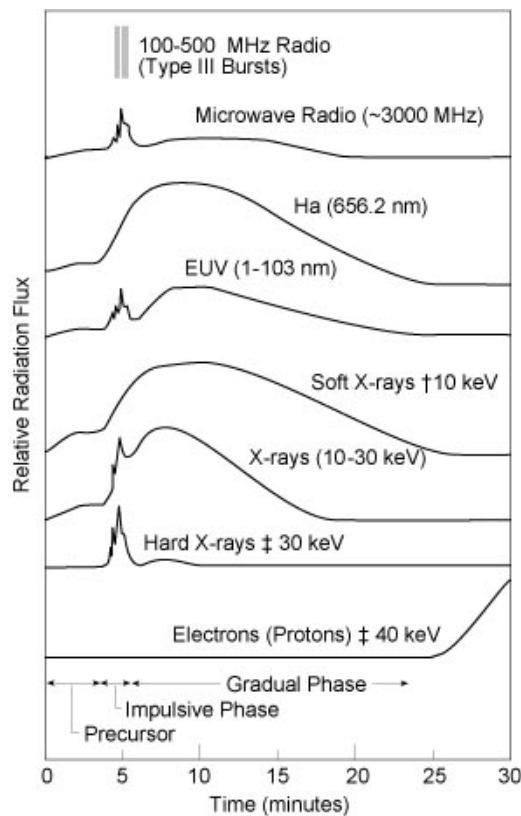
Figuur 1.7: De aardatmosfeer is transparant voor het zichtbare licht en voor radiogolven.

Een zonnevlam komt meestal voor in een actief gebied, dit is een gebied met verhoogde  $H\alpha$ -emissie. Actieve gebieden bestaan altijd uit één of meerdere zonnevlekken.

De kans op zonnevlammen stijgt met toenemende complexiteit van het magnetisch veld. Stel bijvoorbeeld dat alle zuidpolen aan één kant van de groep zitten en de noordpolen aan de andere kant. Zulk een weinig complex magnetisch veld leidt zelden tot zonnevlammen. Als de noordpolen en zuidpolen echter willekeurig door elkaar zitten, krijgen we een veel complexer magnetisch veld waar de kans op magnetische reconnectie veel groter is. De magnetische complexiteit van een zonnevlekkengroep wordt aangegeven door de Mount Wilson-classificatie. De snelheid waarmee een actief gebied groeit, is ook bepalend voor de kans op zonneactiviteit.

Een actief gebied is geen twee-dimensionale structuur maar gaat terug tot diep in de fotosfeer en strekt zich uit door de chromosfeer en de transi-tielaag tot in de corona. Een fundamenteel onderdeel van een actief gebied zijn fotosferische fluxbuizen en de coronale magnetische lussen. Doordat er heet plasma door deze lussen loopt, geven ze de chromosfeer en de corona een structuur.

De energie die tijdens een uitbarsting vrijkomt, moet van het magneetveld afkomstig zijn want de thermische energie is te klein, net zoals mogelijke gra-vitationele energie. Ook nucleaire energie is niet mogelijk omdat de tempera-tuur en de dichtheid te laag is om kernfusie te hebben. De enige mogelijkheid die dus overblijft is elektromagnetische energie.



Figuur 1.8: Een zonnevlam gemeten in verschillende golflengten.

Een zonnevlam bestaat uit drie fasen: de opbouwende fase (*Eng.: the precursor*), de impulsieve fase (*Eng.: the impulsive phase*) en de hoofdfase (*Eng.: the gradual phase*) (zie figuur 1.8). De opbouwende fase kan enkele minuten tot enkele uren duren en kondigt de zonnevlam bij wijze van spreken

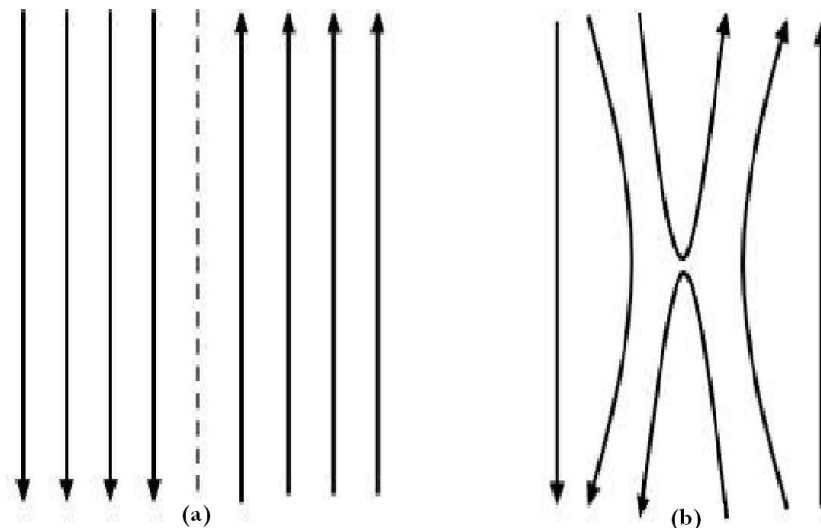


aan. Tijdens deze fase kan er bijvoorbeeld een filament of protuberans uitbarsten waarmee het magnetenveld zich ontdoet van een deel van de opgebouwde spanning en er tegelijkertijd al energie vrijkomt. Enkele minuten voor de impulsieve fase start, zal het plasma lichtjes opwarmen en geleidelijk helderder worden. Dit komt doordat het magnetenveld instabiel is geworden en zich aan het herstructureren is waardoor er energie vrijkomt.

Deze herstructurering is het gevolg van magnetische reconnectie (zie figuur 1.9). Op plaatsen waar magnetische veldlijnen met tegengestelde polariteit te dicht bijeen komen, zullen de veldlijnen zich herschikken. Tijdens deze reconnectie wordt magnetische energie omgezet in kinetische energie en in warmte. De kinetische energie is de versnelling van de deeltjes. De versnelde deeltjes worden afgeremd door botsingen met andere deeltjes uit het plasma en verliezen dus energie. Dit verlies aan energie gebeurt onder de vorm van hoog-energetische straling.

De impulsieve fase is de fase waarin de opgeslagen magnetische energie vrijkomt. Deze fase duurt meestal slechts enkele minuten en is goed waarneembaar in X-stralen (zie figuur 1.8) en  $\gamma$ -stralen.

De magnetische energie komt onder verschillende vormen vrij: er worden deeltjes versneld, het plasma warmt op en wordt versneld en er is meer straling, voornamelijk hoog-energetische straling.



Figuur 1.9: (a) Magnetische veldlijnen met tegengestelde polariteit. (b) De veldlijnen zijn doorgebroken en hebben zich herschikt.

Hierna komt de hoofdfase die uren kan duren. De atmosfeer herstelt zich en evolueert terug naar zijn oorspronkelijke toestand, voordat de zonnevlam

uitbarstte. De energie die is vrijgekomen verspreidt zich in de atmosfeer.

Niet alle zonnevlammen zijn even krachtig, ze worden meestal geclassificeerd volgens de intensiteit van de uitgezonden X-stralen op 1 AE<sup>2</sup> met golflengten tussen 1Å en 8Å (zie tabel 1.1). Dit wordt de X-stralen classificatie genoemd. De klassen zijn A, B, C, M of X. Een A-zonnevlam heeft een intensiteit van orde 10<sup>-8</sup> Watt/m<sup>2</sup>. Een B-zonnevlam is van orde 10<sup>-7</sup> W/m<sup>2</sup> enz. Een X-zonnevlam is van orde 10<sup>-4</sup> W/m<sup>2</sup> of hoger. Iedere klasse is nog eens onderverdeeld (zie figuur 1.10). Een X17.2 zonnevlam heeft een intensiteit gelijk aan 17.2 \* 10<sup>-4</sup> Watt/m<sup>2</sup>. Voor een M3.5 zonnevlam is de intensiteit 3.5 \* 10<sup>-5</sup> Watt/m<sup>2</sup>.

klasse	sterkte van de piek (W/m <sup>2</sup> ) tussen 1Å en 8Å
A	$I < 10^{-7}$
B	$10^{-7} \leq I < 10^{-6}$
C	$10^{-6} \leq I < 10^{-5}$
M	$10^{-5} \leq I < 10^{-4}$
X	$I \geq 10^{-4}$

Tabel 1.1: De classificatie van zonnevlammen volgens de intensiteit van de uitgezonden X-stralen.

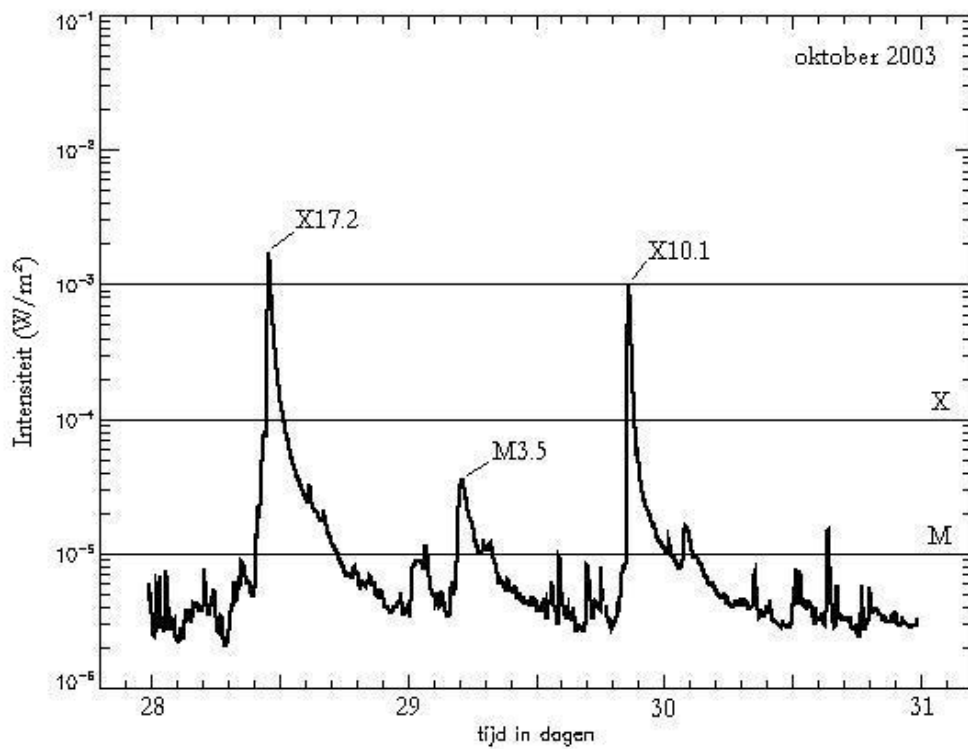
Zonnevlammen kunnen ook geclassificeerd worden op basis van de grootte van het oppervlak dat ze hebben op het moment dat ze het helderst zijn. Dit noemt men de optische classificatie. De helderheid wordt gemeten in het zichtbaar licht, namelijk H $\alpha$ . Dit is een energie-overgang van waterstof die straling geeft met een golflengte van 656.3 nm.

Het oppervlak van de zonnevlam wordt omgezet in een geassocieerd oppervlak dat wordt uitgedrukt in miljoenen van de hemisfeer van de zon. De hemisfeer van de zon is een halfrond. Dit oppervlak moet gecorrigeerd worden als de zonnevlam dicht tegen de rand van de zon plaatsvindt. Met dit resultaat voor het oppervlak kan men dan de sterkte (*Eng.: importance*) van de zonnevlam bepalen (zie tabel 1.2).

Naast de sterkte wordt er ook een waarde aan de helderheid van de zonnevlam toegekend (zie tabel 1.3). Hiervoor wordt de helderheid vergeleken met de sterkte van de achtergrondstraling, dit is de straling die de zon uitstraalt op plaatsen waar er niets gebeurt. De helderheid van de zonnevlam is niet zo een heel belangrijke parameter omdat deze sterk afhangt van de gebruikte H $\alpha$ -filter.

---

<sup>2</sup>1 AE (astronomisch eenheid) of AU (astronomic unit) komt overeen met 1.49598 \* 10<sup>11</sup> m oftewel de gemiddelde afstand tussen de zon en de aarde.



Figuur 1.10: Enkele zonnevlammen op het einde van oktober 2003.

sterkte	grootte van het geassocieerde oppervlak
0	$> 10 - < 100$
1	$> 100 - < 250$
2	$> 250 - < 600$
3	$> 600 - < 1200$
4	$> 1200$

Tabel 1.2: De sterkte van een zonnevlam gelinkt aan het geassocieerde oppervlak.

Meestal worden de zonnevlammen geclassificeerd aan de hand van de gemeten X-straling omdat dit een correctere en makkelijkere classificatie is.

klasse	helderheid (% van de achtergrondstraling)
F (zwak/faint)	> 160% – < 260%
N (normaal/normal)	> 260% – < 360%
B (sterk/brilliant)	> 360%

Tabel 1.3: De helderheid van een zonnevlam.

Het aantal zonnevlammen dat gemiddeld per dag wordt gemeten is afhankelijk van de plaats in de zonnecyclus. Tijdens een zonneminimum is er gemiddeld 1 zonnevlam per dag en tijdens een zonnemaximum zijn er gemiddeld 20. Hierbij houdt men enkel rekening met C-zonnevlammen of sterker. Het is natuurlijk mogelijk dat er tijdens een zonneminimum een lange periode voorkomt waarin geen zonnevlam gedetecteerd wordt (bijvoorbeeld oktober 2005). En er zijn periodes waarin er meerdere per dag zijn.

Heel sterke zonnevlammen komen niet zo vaak voor, slechts enkele per jaar, zelfs tijdens een zonnemaximum.

Het brede spectrum van straling die tijdens een zonnevlam wordt uitgezonden, kan op aarde problemen veroorzaken. Door deze straling wordt de ionosfeer van de aarde beïnvloed (SID Sudden Ionospheric Disturbance) waardoor er storingen in de radiocommunicatie kunnen ontstaan. Het zijn vooral de sterke zonnevlammen (M-niveau en X-niveau) die een groot effect hebben op de aardatmosfeer. Bovendien is deze hoge concentratie van straling niet gezond voor astronauten in de ruimte. Het is dus nuttig en belangrijk dat zonnevlammen voorspeld kunnen worden zodat er rekening kan gehouden worden met hun gevolgen en maatregelen kunnen getroffen worden.

#### 1.2.4 Solar Energetic Particle event (SEP-event)

SEP-events (Solar Energetic Particles) zijn deeltjesstormen. Een deeltjesstorm is een plotse, sterk verhoogde flux van versnelde (hoog-energetische) geladen deeltjes. Na magnetische reconnectie in de corona kan het gebeuren dat geladen deeltjes die rond de magnetische veldlijnen draaien, de ruimte in gestuurd worden. Deze versnelde deeltjes zijn meestal protonen en daarom wordt er vaak gesproken over protonenstormen. Deze stormen kunnen enkele uren tot dagen duren.

SEP-events worden steeds met zonnevlammen en CME's (coronale massa-uitstoten) geassocieerd, omdat deze gebeurtenissen plaatsvinden tijdens of

vlak na een magnetische reconnectie. De zonnevlammen geassocieerd met een deeltjesstorm kunnen sterk in intensiteit verschillen. De intensiteit ligt ongeveer tussen  $10^{-6}$  W/m<sup>2</sup> en  $10^{-2}$  W/m<sup>2</sup>. De geassocieerde zonnevlam is dus meestal een C-zonnevlam of groter. Het is echter niet zo dat iedere C-zonnevlam of sterker aan een SEP wordt gelinkt. SEP-events zijn weinig voorkomende gebeurtenissen op de zon en zijn sterk gerelateerd met de zonnecyclus (net als alle andere gebeurtenissen op de zon). Momenteel evolueert de zon naar een minimum, met als gevolg dat er zeer weinig SEP-events voorkomen. Tijdens de in deze thesis bestudeerde periode (2003-2005) werden er slechts 19 SEP-events geregistreerd.

Het zou handig zijn om deze gebeurtenissen te kunnen voorspellen omdat protonenstormen de technologische systemen op aarde en in de ruimte verstoren en schade aanbrengen. Doordat het nog niet mogelijk is om deze SEP-events accuraat te voorspellen, is er na de detectie van een storm slechts weinig tijd om de betrokken partijen te waarschuwen. Een SEP-event bestaande uit protonen met een energie gelijk aan 10 MeV doet er ongeveer 1 uur en 20 minuten over om 1 AE af te leggen. Als de protonen echter een energie van 100 MeV hebben, dan leggen ze deze afstand af in slechts 25 minuten.

### 1.2.5 Ruimteweer

Volgens de definitie gegeven door ESA (European Space Agency) omschrijft ruimteweer toestanden op de zon en in de zonnwind, magnetosfeer en ionosfeer die de werking en betrouwbaarheid van technologische systemen op aarde en in de ruimte beïnvloeden en die de gezondheid kunnen aantasten.

Naast zonnevlammen zijn er nog andere gebeurtenissen en structuren op de zon die het ruimteweer mee bepalen: coronale gaten, coronale massa-uitstoot (CME) en SEP-events.

Een coronaal gat is een groot donker (dus koud) gebied in de lage corona, zichtbaar in extreem-ultraviolet (EUV). In beelden van SOHO/EIT 284Å kan men ze het duidelijkst waarnemen. Ze bestaan uit open magnetische veldlijnen waardoor geladen deeltjes de ruimte ingezonden worden met hoge snelheden. Een CME is een uitbarsting van plasma, geladen deeltjes, op de zon. Deze plasmawolken kunnen zich met snelheden tot 2000 km/s van de zon verwijderen.

Alleen CME's die zich in de richting van de aarde voortplanten, kunnen voor waarneembare effecten zorgen. Als een CME met het magneetveld van de aarde botst dan kan er magnetische reconnectie plaatsvinden. Het magnetisch veld van de aarde en de ionosfeer worden hierdoor verstoord: een geomagnetische storm.

De verhoogde straling tijdens een zonnevlam zal op aarde door de atmosfeer geabsorbeerd worden, maar hierdoor ioniseert de atmosfeer. De ionosfeer wordt dikker waardoor er storingen in het radioverkeer ontstaan. Daardoor kan bijvoorbeeld het contact met vliegtuigen of satellieten verloren gaan. Door verlies van tijdelijk contact met satellieten kan bijvoorbeeld de GPS (Global Positioning System) uitvallen, wat dan weer gevaar oplevert voor schepen.

In de ruimte zelf kunnen de geladen deeltjes satellieten schade toebrengen aan de zonnepanelen of er kunnen inductiestromen ontstaan waardoor de instrumenten aan boord van de satelliet beschadigd worden.

De geladen deeltjes die naar de aarde vliegen worden door het magneetveld van de aarde naar de polen geleid. Daar dringen ze de atmosfeer binnen en zorgen voor het poollicht.

Voor de mens is het niet gezond blootgesteld te worden aan een hoge concentratie straling of geladen deeltjes, daarom moeten zeker tijdens deze stormen vluchten over de polen vermeden worden omdat daar de straling het sterkst is. Voor astronauten in de ruimte is een storm nog veel gevaarlijker omdat zij niet door een magneetveld beschermd worden.

Als men zonnevlammen kan voorspellen is het voor de astronauten veel makkelijker te bepalen wanneer ze de ruimte in kunnen voor bijvoorbeeld een reparatie aan een ruimtestation.

Naast storingen in het radioverkeer kunnen er als gevolg van een magnetische storm inductiestromen ontstaan op bijvoorbeeld pijpleidingen. In 1989 is in Quebec een stroomcentrale uitgevallen tijdens een storm, waardoor miljoenen mensen gedurende 9 uur zonder stroom zaten.

### **1.2.6 Observeren van de zon vanuit de ruimte**

Er zijn drie belangrijke redenen waarom men de zon vanuit de ruimte observeert. Ten eerste kan men dan waarnemen over het hele elektromagnetische spectrum. De zon wordt voornamelijk in (extreem-)ultraviolette en X-stralen geobserveerd. Ten tweede heeft men weinig of geen last van verstrooiing van het licht. De atmosfeer op aarde verstrooit het licht waardoor het zeer moeilijk is om bijvoorbeeld de corona waar te nemen. De corona is een zeer zwakke bron van zichtbaar licht en wordt volledig overstemd door de veel heldere fotosfeer. En ten derde kan men vanuit de ruimte ook veel langer aan een stuk door observeren, terwijl op aarde de weersomstandigheden een belangrijke rol spelen en het feit dat er op aarde een dag en een nacht is.

In 1975 werd de eerste GOES (Geostationary Operational Environmental Satellite) satelliet gelanceerd. Deze satellieten detecteren o.a. de intensiteit van de X-stralen die de zon uitzendt. Uit deze data kan men de sterkte van een zonnevlam bepalen. Momenteel gebruikt men data van GOES-10 en GOES-12. GOES-12 heeft ook een instrument aan boord dat beelden neemt in X-stralen, de X-Ray Imager. Er zijn ook andere satellieten die beelden van de zon maken en data opmeten.

De afgelopen vijftig jaar zijn er verscheidene satellieten de ruimte in gestuurd door NASA (Amerika), ESA (Europa), ISAS (Japan) en Rusland. Enkele voorbeelden van deze satellieten zijn de Solar Maximum Mission (NASA), Hinotori (ISAS), GRANAT (Rusland en enkele Europese landen). Deze zijn allen voor 1990 gelanceerd. Daarna zijn er enkele van de meest succesvolle satellieten de ruimte in gegaan. Dit zijn onder andere Ulysses (ESA en NASA), Yohkoh (ISAS), SOHO (ESA en NASA) en TRACE (NASA) die, afgezien van Yohkoh, nog allemaal in werking zijn. Een van de nieuwste satellieten is RHESSI (NASA) die in 2002 gelanceerd is. Deze satelliet wordt ook wel HESSI genoemd.

# Hoofdstuk 2

## Catalogi, de GOES-satellieten en detectiemethodes.

In dit hoofdstuk bekijken we welke catalogi van zonnevlammen er al bestaan en bespreken we er enkele. De catalogus die wordt aangelegd door het SEC (Space Environment Center) zullen we een beetje uitgebreider bespreken omdat dit de catalogus is waarmee we de door ons opgestelde gaan vergelijken. In een volgend deel wordt er wat meer uitleg gegeven over de GOES-satellieten omdat we de data van deze satellieten gebruiken. In het vierde deel van dit hoofdstuk worden twee methodes besproken om zonnevlammen te detecteren en geven we een beetje uitleg bij de gebruikte programmeertaal. Het laatste deel beschrijft de catalogus die wij hebben samengesteld.

### 2.1 Catalogi

Omdat we in deze thesis een catalogus van zonnevlammen opstellen, is het nuttig om eens na te gaan wat voor catalogi er reeds bestaan en wat de voordelen van nog een andere catalogus kunnen zijn. Er zijn verschillende catalogi te vinden die de gebeurtenissen op de zon vastleggen. Een aantal van deze catalogi zullen we in het kort beschrijven. De catalogus aangelegd door SEC (Space Environment Center) is voor ons zeer belangrijk. Met deze catalogus zullen wij de onze vergelijken omdat SEC ook de GOES-data gebruiken.

#### 2.1.1 Korte bespreking van enkele bestaande catalogi

De satelliet Compton GRO (Gamma-Ray Observatory) heeft o.a. BATSE (Burst And Transient Source Experiment) aan boord. Het SDAC (Solar Data



Analysis Center) gebruikt de data die door dit instrument worden opgemeten en biedt een catalogus aan van zonnevlammen. Daarnaast zijn bij hen ook grafieken en tijdsprofielen van zonnevlammen verkrijgbaar.

De catalogus van zonnevlammen bevat metingen vanaf april 1991 tot mei 2000 en is gedeeltelijk automatisch en gedeeltelijk manueel samengesteld. De duur (begin- en eindtijd) wordt manueel bepaald aan de hand van een grafiek van de zonnevlam. Toen er nog zonnevlammen gedetecteerd werden door hen, zat men steeds één dag achter met de detectie vermits men de metingen van de vorige dag analyseerde. Alle lijsten en metingen zijn op de website van het SDAC beschikbaar.

Aan boord van de Russische satelliet GRANAT bevond zich WATCH (Wide Angle Telescope for Cosmic Hard X-Rays). Deze telescoop heeft de zon van 1990 tot halverwege 1992 geobserveerd en metingen gedaan van de harde X-stralen<sup>1</sup>. Met behulp van deze metingen heeft men zonnevlammen gedetecteerd en een catalogus opgesteld. De detectie van zonnevlammen gebeurde automatisch volgens bepaalde criteria (Crosby et al. 1998).

TRACE (Transition Region And Coronal Explorer) detecteert enkel X- en M-zonnevlammen. Tijdens de periode 1998-2002 werden ook C-zonnevlammen opgemeten. De gedetecteerde zonnevlammen worden voorzien van beelden genomen door TRACE en ze worden vergeleken met de metingen en observaties van onder andere GOES, SOHO en HESSI.

Op de website van Egso (European GRID of Solar Observation) zijn verschillende catalogi bijeengezet. Ze vermelden ook of deze catalogus nog steeds wordt aangevuld en wanneer men begonnen is met de catalogus. Het is wel niet altijd even duidelijk wat nu juist in de catalogus staat.

Een laatste catalogus waar ik nog iets over wil zeggen, is de catalogus die aangelegd wordt door BIMA (Berkeley Illinois Maryland Array) en OVRO (Owens Valley Radio Observatory) samen. Zij doen beide metingen vanop aarde met behulp van radiotelescopen. Dit zijn telescopen die radiogolven opmeten, vergelijkbaar met een schotelantenne maar dan veel groter. Zij meten voornamelijk in het gebied van de millimetergolven.

## 2.1.2 De SEC-catalogus

Het SEC maakt al een catalogus van de gebeurtenissen op de zon sinds eind 1975, toen de eerste GOES-satelliet gelanceerd werd. De detectie van zonnevlammen gebeurt al vanaf toen automatisch, maar wordt soms manueel

---

<sup>1</sup>Harde X-stralen hebben een energie tussen 10 keV en 1000 keV. X-stralen met een lagere energie worden zachte (*Eng.: soft*) X-stralen genoemd. De grens tussen deze twee soorten X-stralen is niet al te duidelijk gedefinieerd.

vervolledigd. Als een gebeurtenis op de zon een te trage toename van X-stralen heeft, dan is het mogelijk dat dit niet gedetecteerd wordt door hun computer en moet het dus manueel aangevuld worden.

Het SEC definieert de begintijd van een zonnevlam als de eerste minuut van vier minuten waarin de flux van X-stralen tussen  $1\text{\AA}$  en  $8\text{\AA}$  sterk monotoon stijgt. De piektijd is het tijdstip waarop de flux een maximum bereikt en de eindtijd is het tijdstip waarop de flux gedaald is naar een punt halfweg tussen de flux bereikt op de piek en de waarde van de achtergrondstraling.

In hun lijst zijn niet alleen zonnevlammen terug te vinden die door de GOES-satellieten worden gedetecteerd, maar er zijn ook waarnemingen van andere observatoria. Per dag is er een lijst met daarin de gebeurtenissen van die dag.

Elke waarneming krijgt een door het SEC gekozen nummer toegekend (zie tabel 2.1). Een nummer kan verschillende detecties bevatten, deze worden als eenzelfde gebeurtenis beschouwd. Naast zonnevlammen opgemeten in X-stralen (door de GOES-satellieten) staan er onder andere ook optische zonnevlammen in, dit zijn zonnevlammen die waargenomen zijn in  $H\alpha$ , en zonnevlammen die door de SXI (Solar X-Ray Imager) worden gedetecteerd. SXI is een instrument aan boord van GOES-12 dat beelden van de zon neemt in X-stralen.

Men vermeldt ook of een gebeurtenis door meerdere observatoria is waargenomen. In dat geval zijn de gegevens die in de lijst staan, één van de detecties gekozen door de samensteller van de lijst. Verder geeft men de begin-, piek- en eindtijd van de gebeurtenis. Als er tijden ontbreken dan worden deze weergegeven door '////'.

Men zegt ook welk observatorium de waarneming heeft gedaan en wat de kwaliteit (*Eng.: quality*) van deze is. Voor optische zonnevlammen zegt de kwaliteit iets over de omstandigheden waarin men heeft waargenomen. Omdat optische zonnevlammen vanop aarde worden gedetecteerd, heeft dit betrekking op het weer op aarde. De zonnevlammen waargenomen door GOES-10 en GOES-12 hebben altijd een uitstekende kwaliteit. Bij de andere gebeurtenissen zegt de kwaliteit iets over de deugdelijkheid van de metingen.

Er wordt ook gezegd in welke frequentie (in MHz) de radio uitbarstingen (*Eng.: radio bursts*) worden gedetecteerd of de locatie op het zonneoppervlak van andere gebeurtenissen. Voor X-stralen zonnevlammen vermeldt men de golflengte waarbij de intensiteit wordt gemeten. Daarnaast zegt men ook nog iets specifiek over ieder soort van gebeurtenis. Bij optische zonnevlammen wordt bijvoorbeeld de sterkte van de zonnevlam gegeven door de optische classificatie. Bij X-stralen zonnevlammen gebeurt de classificatie aan de hand van de intensiteit van de uitgezonden X-stralen. Bij X-stralen zonnevlammen wordt ook de geïntegreerde flux gegeven, dit is de totale flux

van de zonnevlam vanaf zijn begin tot zijn einde.

Het laatste punt in de lijst is het 'solar region number', dit is een nummer dat door het SEC wordt toegekend aan ieder actief gebied op de zon. Bij optische gebeurtenissen geven de observatoria zelf het nummer mee en voor X-stralen zonnevlammen wordt het nummer door het SEC gegeven. Bij de zonnevlammen die door de SXI worden waargenomen, wordt het nummer door een computerprogramma toegekend. Het SEC biedt ook lijsten aan met specifieke eigenschappen van ieder actief gebied, zoals de grootte, de plaats op de zon, de groei, . . . .

In de catalogus staan geen A-zonnevlammen omdat deze bijna nooit waarneembaar zijn. Enkel tijdens een zonneminimum zal de achtergrondstraling laag genoeg zijn om ze te kunnen waarnemen.

Event	Begin	Max	End	Obs	Q	Type	Loc/Frq	Particulars	Reg#
3210	0000	////	0130	CUL	C	RSP	23-100	CTM/1	
3200 +	0108	0122	0128	G12	5	XRA	1-8A	C2.2 1.7E-03	0510
3200	0118	0121	0129	LEA	2	FLA	S18W59	SF ERU	0510
3220	0303	////	0303	CUL	C	RSP	18-150	III/3	
3230	0340	////	0341	CUL	C	RSP	20-200	III/2	
3240	0426	////	0426	CUL	C	RSP	18-140	III/3	
3300	0651	////	0652	CUL	C	RSP	18-180	III/2	
3260	0657	0700	0700	SVI	G	RBR	245	98	
3270	0700	////	1200	IZM	F	RNS	204	20	
3280	1702	1702	1702	SAG	G	RBR	245	75	
3310	2217	////	1015	LEA	C	RSP	063-180	CTM/1	
3310	2313	////	2313	CUL	C	RSP	20-40	III/3	

Tabel 2.1: De waargenomen gebeurtenissen door het SEC op 4 december 2003.

## 2.2 Geostationary Operational Environmental Satellite (GOES)

GOES zijn geostationaire satellieten en hebben dus een geostationaire baan rond de aarde. Dit wil zeggen dat ze op ongeveer 35790 km boven zeeniveau ter hoogte van de evenaar hangen en zo snel rond draaien dat ze steeds boven hetzelfde punt blijven. Geostationaire banen worden meestal voor weersatellieten en satellieten voor telecommunicatie gebruikt. De GOES-satellieten zijn in de eerste plaats weersatellieten waarvan de data over de hele wereld gebruikt worden. Er zijn steeds twee GOES-satellieten gelijktijdig in gebruik zodat ongeveer 60% van de aarde bestreken wordt.

De GOES-satellieten zijn door NASA (National Aeronautics and Space Administration) gelanceerd. Daarna zijn de satellieten overgedragen aan het NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration). Dit is een organisatie die zich toespitst op de condities van de oceanen en de atmosfeer en zij gebruiken de metingen van de GOES-satellieten om onder andere weersvoorspellingen te doen.

De voorgangers van de GOES-satellieten zijn de twee SMS (Synchronous Meteorological Satellite) satellieten. SMS-1 is in 1974 en SMS-2 in 1975 gelanceerd. De eerste drie GOES-satellieten (GOES-1, -2 en -3) zijn in essentie identiek aan deze SMS-satellieten.

De opvolgers van GOES-12 zijn al klaar en moeten enkel nog de ruimte ingezonden worden. GOES-N is op 24 mei 2006 succesvol gelanceerd. Eens hij in zijn juiste baan zit en de controle van de instrumenten aan boord geen problemen kent, zal GOES-N omgedoopt worden in GOES-13. GOES-O wordt waarschijnlijk in april 2008 gelanceerd en GOES-P in oktober 2009. Er zijn ook al plannen voor GOES-R, maar deze zijn nog maar in een beginstadium. Deze drie opvolgers hebben dezelfde instrumenten aan boord als GOES-12, maar natuurlijk wel verbeterde versies.

Naast de instrumenten die nodig zijn voor het weer, hebben de satellieten ook een Space Environment Monitor (SEM) aan boord. Deze SEM onderzoekt de emissie van deeltjes van de zon en helpt bij het bestuderen van de effecten van de activiteit van de zon op telecommunicatiesystemen op aarde. De SEM bestaat uit twee magnetometers die de sterkte van het magneetveld van de aarde meten. Verder bevat de SEM een X-stralen sensor (XRS) een detector die hoog-energetische protonen en  $\alpha$ -deeltjes detecteert (HEPAD) en een sensor voor energetische deeltjes (protonen, elektronen en  $\alpha$ -deeltjes) (EPS).  $\alpha$ -deeltjes bestaan uit twee protonen en twee neutronen,

dit is eigenlijk tweevoudig geïoniseerd Helium ( $\text{He}^{+2}$ ).

Het is de XRS waarin wij geïnteresseerd zijn omdat deze de metingen doet die wij gebruiken.

### 2.2.1 De XRS

De XRS is een X-stralen telescoop die de flux afkomstig van de zon meet in twee spectrale banden. Er is een band met golflengten tussen  $0,5\text{\AA}$  en  $4\text{\AA}$ , dit wordt de korte golflengte genoemd, en een band met golflengten tussen  $1\text{\AA}$  en  $8\text{\AA}$ , de lange golflengte. De X-stralen worden door twee ionenkamers gedetecteerd, voor iedere band een kamer. Een ionenkamer bestaat uit een ingesloten gas waar de X-stralen worden doorgestuurd. Hierdoor wordt een deel van het gas door de fotonen geïoniseerd, de graad van ionisatie hangt af van de intensiteit van de X-stralen en de recombinatiesnelheid van het gas. In de ionenkamer is er een positieve anode en een negatieve kathode tegenover elkaar geplaatst zodat er een elektrisch veld kan aangelegd worden loodrecht op de inkomende X-stralenbundel. Door dit elektrisch veld worden de positieve ionen en negatieve elektronen van elkaar gescheiden voordat ze kunnen recombineren. De elektronen worden door de anode aangetrokken en de ionen door de kathode. Dit veroorzaakt een elektrische stroom die opgemeten wordt en waaruit de intensiteit van de invallende X-stralen wordt bepaald. Hoe groter de intensiteit van de X-stralen, hoe hoger de ionisatiegraad en dus hoe sterker de elektrische stroom.

De XRS heeft een beperkt bereik in intensiteit voor iedere golflengte. De volgende waarden zijn enkel voor de satellieten GOES-8 tot GOES-12. Voor de korte golflengte wordt er gemeten tussen  $5 * 10^{-9} - 5 * 10^{-4} \text{ W/m}^2$  en voor de lange golflengte tussen  $2 * 10^{-8} - 2 * 10^{-3} \text{ W/m}^2$ . Als de gemeten flux van X-stralen groter is dan 20 keer de drempelwaarde, dan is de fout kleiner dan 2% van de afgelezen waarde. Hoe dichter de meetwaarde dus bij de drempelwaarde ligt, hoe groter de fout op de meting. De drempelwaarde voor de lange golflengte ligt in het A-niveau met als gevolg dat er een grote meetfout is bij kleine waarden. Dit is een reden waarom niet in alle catalogi A-zonnevlammen worden opgenomen. De grote fout op de kleine waarden is ook de reden waarom er zo'n grote verschillen kunnen zijn tussen de lage waarden bij de lange golflengte en de korte golflengte als we de metingen van twee satellieten met elkaar vergelijken.

## 2.3 GOES-10 en GOES-12

Men gebruikt steeds data van twee satellieten om een back-up te hebben indien één satelliet geen metingen kan doen. GOES-10 is de oudste satelliet van de twee die momenteel in gebruik zijn en wordt dus als back-up gebruikt. Omdat de satellieten geostationair zijn, bevinden ze zich op regelmatige tijdstippen in de schaduw van de aarde waardoor er geen metingen kunnen gebeuren. Ook daarom worden er twee satellieten gebruikt, hun data vullen elkaar aan zodat er zo weinig mogelijk ontbrekende data zijn.

De data die we nodig hebben, zijn afkomstig van de website van het SEC (Space Environment Center): <http://www.sec.noaa.gov> en zijn vrij te downloaden.

Er zijn twee verschillende reeksen van data af te halen: bestanden waarin de gemiddelde flux om de 5 minuten wordt gemeten en bestanden met de gemeten flux van iedere minuut. Wij zullen de laatste reeks van data gebruiken omdat deze nauwkeuriger is.

In het begin van zo'n bestand staat van welke satelliet de metingen afkomstig zijn en de positie van de satelliet in westerlengte (GOES-10 staat op W135 en GOES-12 op W075). De metingen worden op de volgende manier weergegeven (zie tabel 2.2):

jaar	maand	dag	tijd in uren en minuten	Modified Julian Day (MJD)	tijd in seconden	intensiteit van de korte golflengte	intensiteit van de lange golflengte
2006	04	19	0240	53844	9600	1.44e-09	2.80e-08
2006	04	19	0241	53844	9660	1.41e-09	2.89e-08
2006	04	19	0242	53844	9720	1.41e-09	3.29e-08
2006	04	19	0243	53844	9780	1.41e-09	3.43e-08
2006	04	19	0244	53844	9840	1.41e-09	3.43e-08
2006	04	19	0245	53844	9900	1.41e-09	3.36e-08
2006	04	19	0246	53844	9960	1.43e-09	3.44e-08
2006	04	19	0247	53844	10020	1.42e-09	3.45e-08
2006	04	19	0248	53844	10080	1.41e-09	3.46e-08
2006	04	19	0249	53844	10140	1.41e-09	3.46e-08

Tabel 2.2: Een aantal lijnen uit het bestand waar de metingen om de minuut van GOES-12 van 19 april 2006 in staan.

De datum en tijdsweergave zijn altijd in UT (universele tijd of Greenwich tijd). De Julian Day (JD) is het aantal dagen dat gepasseerd is sinds 1 januari 4713 BC om 12 uur 's middags. De modified Julian Day (MJD) is de Julian Day - 2400000,5 dagen. Dit is het aantal dagen dat sinds 17 november

1858 is gepasseerd. De MJD begint om middernacht. De intensiteit van de korte en de lange golflengte wordt weergegeven in  $\text{W}/\text{m}^2$ . Als er metingen ontbreken, wordt er  $-10^5$  ingegeven voor de flux.

## 2.4 Twee verschillende methodes om zonnevlammen automatisch te detecteren

Eerst zetten we alle metingen van GOES-10 in een tabel en daarna zetten we de metingen van GOES-12 erover, behalve op die plaatsen waar GOES-12 geen metingen voor heeft. Als de flux gelijk is aan  $-10^5$  zetten we deze om naar nul. Als de flux van de X-straling boven  $10^{-7} \text{ W}/\text{m}^2$  ligt, dan is er bijna geen verschil tussen de gemeten waarden van beide satellieten. Onder dit niveau is er soms een duidelijk verschil, vooral bij zeer lage waarden. Nadat we de data hebben samen gezet, kunnen we beginnen met het detecteren van zonnevlammen. Dit hebben we op twee verschillende manieren gedaan.

### 2.4.1 Eerste methode

Met deze methode willen we bijvoorbeeld alle M-niveau zonnevlammen detecteren. Daarvoor nemen we enkel de data boven het M-niveau ( $10^{-5} \text{ W}/\text{m}^2$ ). Als we de juiste data geselecteerd hebben, dan kunnen we op zoek gaan naar de piektijden van de zonnevlammen. De detectie van piekwaarden (lokaal maximum als functie van de tijd), kan geïmplementeerd worden door naar meetpunten te zoeken waar zowel het voorgaande als het volgende meetpunt lager ligt. Als we op deze wijze pieken gevonden hebben, kunnen we in principe ook het begin en het einde van de zonnevlam bepalen.

Na een aantal testen hebben we echter besloten dat deze methode niet naar behoren werkt. Ten eerste hebben we veel te veel pieken gedetecteerd als gevolg van de fluctuaties in de gemeten flux. Ten tweede kunnen niet alle begin- en eindtijden juist bepaald worden. Het is namelijk mogelijk dat de flux op deze tijdstippen onder het M-niveau zit.

### 2.4.2 Tweede methode

Deze methode is bedacht door Bogdan Nicula een medewerker van het SIDC (Solar Influence Data Analysis Center).

We nemen 60 opeenvolgende metingen en gaan de sommen en verschillen van deze metingen in een rij zetten. Op de oneven plaatsen zetten we telkens de sommen van twee metingen (op plaats 1 komt de som van 1 en 2, op

plaats 3 de som van 3 en 4, ...) en op de even plaatsen komen de verschillen (op plaats 2 komt  $2 - 1$ , op plaats 4 komt  $4 - 3$ , ...). Vervolgens gaan we de sommen van klein naar groot rangschikken. We nemen de 12 (20%) kleinste sommen verschillend van nul en nemen daar het gemiddelde van. Dan nemen we de maximum 15 (50%) grootste sommen die 20% groter zijn dan het berekende gemiddelde. Deze sommen zijn kandidaat om tot een zonnevlam te horen. Uit deze 15 kandidaten gaan we nu het begin van de zonnevlam bepalen. Een som is mogelijk het begin van een zonnevlam als de som van de verschillen voor en na deze som groter is dan 10% van het berekende gemiddelde. De kleinste van een rij opeenvolgende sommen is het begin van de zonnevlam. Dit is echter de som van twee opeenvolgende metingen, dus het exacte begin is het tijdstip met de kleinste flux van de twee. Alle begintijden die minder dan 10 minuten van elkaar liggen worden als één gebeurtenis beschouwd. De piek van de zonnevlam is dan de grootste waarde volgende op het begin, zolang de flux blijft stijgen. Ook als de pieken minder dan 10 minuten van elkaar liggen wordt het als één zonnevlam beschouwd. De achtergrondstraling is de straling die de zon uitstraalt op tijdstippen zonder zonnevlammen. Het einde wordt dan gedefinieerd als het moment waarop de helft van de som van de grootte van de achtergrondstraling en de grootte van de piek (het gemiddelde van deze twee waarden) bereikt wordt. In deze methode is de grootte van de achtergrondstraling gelijk aan de helft van het gemiddelde van de 12 kleinste sommen verschillend van nul. Deze methode wordt met stappen van 10 minuten herhaald over de hele rij van metingen.

### 2.4.3 IDL en SSWIDL

De implementatie van deze twee methodes gebeurt in IDL (Interactive Data Language). Dit is een programmeertaal die zeer populair is voor beeldverwerking.

Er bestaan verschillende pakketten met bestaande programma's in IDL die kunnen toegevoegd worden. Eén van deze pakketten is het SolarSoft pakket (SSWIDL). Dit is een software-bibliotheek dat onder andere dient voor het analyseren van foto's van de zon. Het omvat verschillende commando's en programma's met betrekking op een aantal satellieten en instrumenten aan boord van deze satellieten, die de zon observeren. Deze satellieten en instrumenten zijn: CDS (SOHO), EIT (SOHO), TRACE, SXT (Yohkoh), GOES, MDI (SOHO), ....



## 2.5 Onze catalogus

Met behulp van de tweede methode stellen we nu onze eigen catalogus van zonnevlammen samen. Figuur 2.2 geeft het formaat van onze catalogus aan, met voor elke zonnevlam zijn begintijd, piektijd, eindtijd en zijn magnitude (intensiteit in X-stralen). De tijdstippen worden om praktische redenen weergegeven vanaf 1 januari 2003.

jaar	maand	dag	begintijd in uren en minuten	piektijd in uren en minuten	eindtijd in uren en minuten	X-stralen klasse	begintijd in dagen	piektijd in dagen	eindtijd in dagen
2003	6	3	123	124	129	C1.70000	153.05417	153.05486	153.05833
2003	6	3	1057	1059	1101	C2.90000	153.45277	153.45416	153.45555
2003	6	3	1739	1819	1857	C2.00000	153.73195	153.75972	153.78612
2003	6	3	2228	2229	2232	B7.30000	153.93263	153.93333	153.93541
2003	6	4	529	546	627	C1.70000	154.22501	154.23680	154.26527
2003	6	4	1543	1545	1554	B4.90000	154.65138	154.65277	154.65903
2003	6	4	1639	1645	1656	B5.50000	154.69028	154.69444	154.70209
2003	6	4	1821	1831	1834	B7.00000	154.76111	154.76805	154.77014
2003	6	5	109	116	132	B6.70000	155.04445	155.04930	155.06041
2003	6	5	143	145	200	B9.10000	155.06805	155.06944	155.07986
2003	6	5	627	647	648	B9.50000	155.26527	155.27916	155.27986
2003	6	5	959	1019	1037	C2.10000	155.41251	155.42639	155.43889
2003	6	5	1159	1201	1208	B7.80000	155.49583	155.49722	155.50209
2003	6	5	1717	1734	1750	C1.70000	155.71666	155.72847	155.73958
2003	6	5	2336	2337	2339	C1.00000	155.97986	155.98056	155.98195

Figuur 2.1: De zonnevlammen op 3, 4 en 5 juni 2003 die wij detecteren met de tweede methode.

# Hoofdstuk 3

## Resultaten

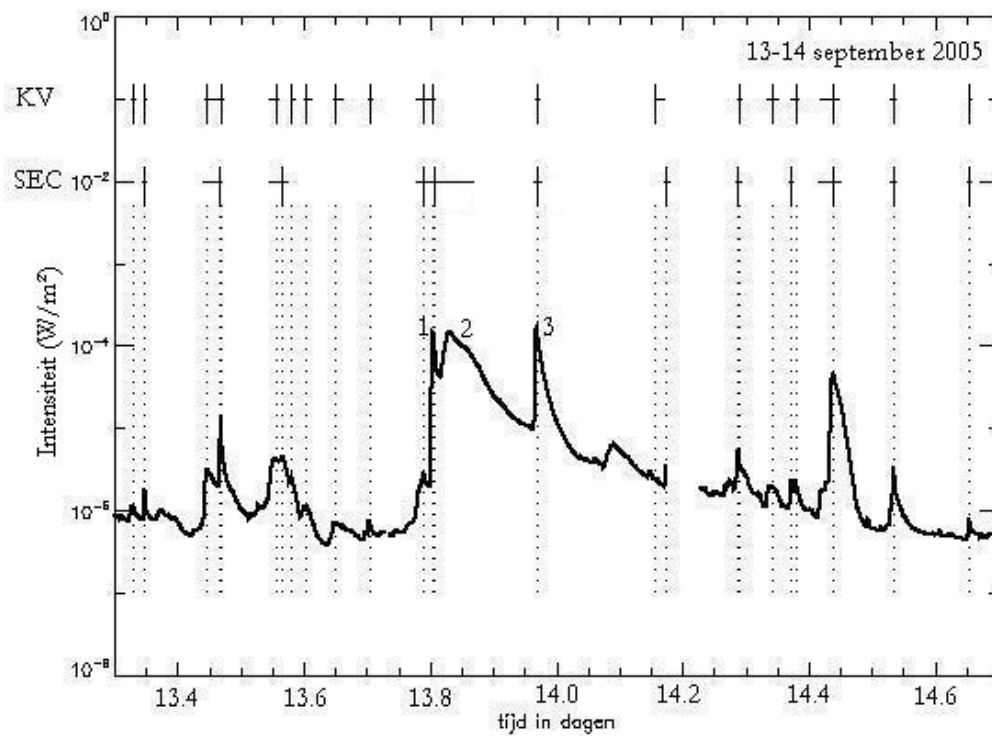
In dit hoofdstuk bespreken we de resultaten van de tweede methode en vergelijken ze met de SEC-catalogus. Hierbij gaan we in een eerste fase de twee catalogi naast elkaar leggen en de verschillen bekijken. In een volgende stap vergelijken we in detail de zonnevlammen die in beide catalogi voorkomen. Van deze gemeenschappelijke zonnevlammen vergelijken we de piektijden en de duur.

### 3.1 Verbeteren van de tweede methode

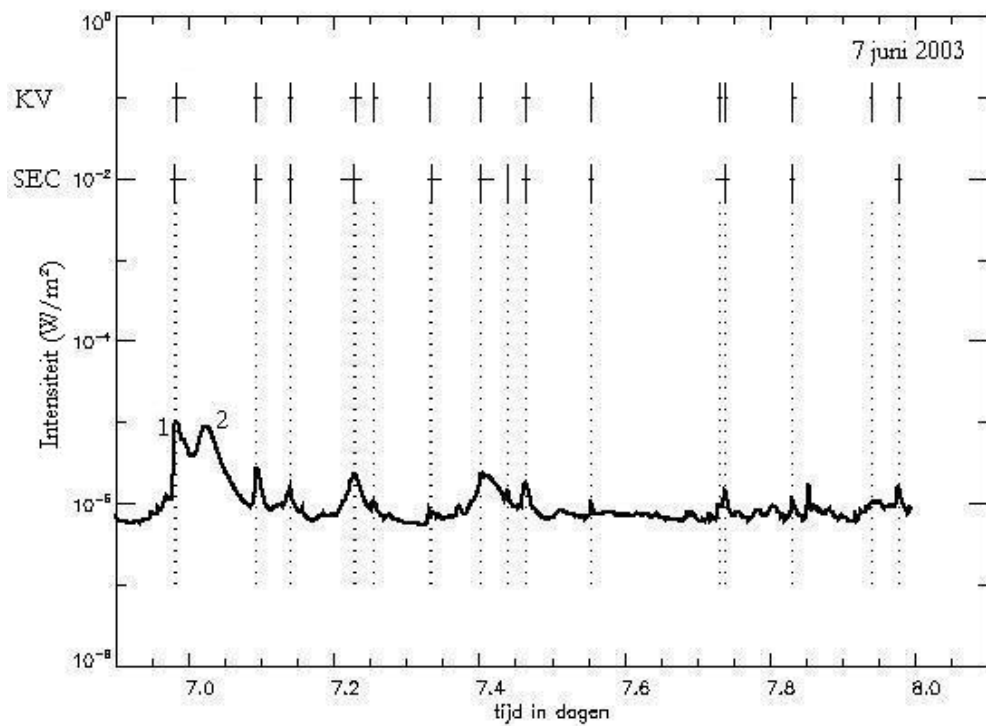
De tweede methode werkt redelijk goed, maar na enkele testen hebben we een aantal ongelukkige afwijkingen vastgesteld. Op figuur 3.1 is bijvoorbeeld te zien dat we de drievoudige X-zonnevlam van 13 september 2005 niet gedetecteerd hebben. Er zijn nog andere voorbeelden te vinden, bijvoorbeeld op 7 juni 2003 (fig. 3.2) waar er kort na een M-zonnevlam (1) een C-zonnevlam (2) volgt, die door ons niet uit de data wordt gefilterd. Daarnaast hebben we ook gemerkt dat de begin- en eindtijden van onze zonnevlammen steeds enkele minuten verschillen van deze gevonden door het SEC.

De methode moet dus aangepast worden. Een som van twee metingen komt in aanmerking om tot een zonnevlam te behoren als de waarde van de lange golflengte 20% groter is dan het berekende gemiddelde. We passen dit aan tot 15%, dit wil zeggen dat de stijging in flux minder groot moet zijn. Het resultaat is niet veelbelovend, op een totaal van ongeveer 9000 zonnevlammen komen er slechts enkele bij en we detecteren nog steeds niet de twee zonnevlammen uit de bovenstaande figuren (fig 3.1 en fig 3.2). Ook als we de waarde naar 10% verlagen is er geen duidelijke vooruitgang.

We moeten dus een andere oplossing zoeken. Er is nog een andere parameter die mee het begin van een zonnevlam bepaalt. De som van twee



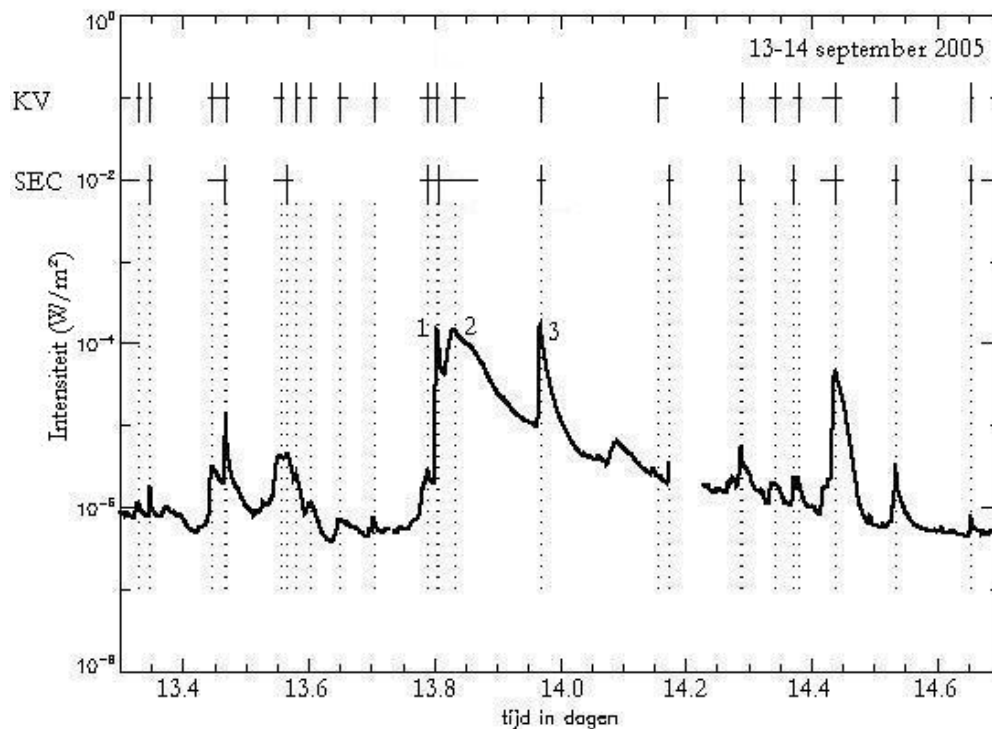
Figuur 3.1: Op 13 september 2005 was er een drievoudige X-zonnevlam (1, 2, 3). De bovenste rij lijnen duiden op de zonnevlammen die wij gedetecteerd hebben, de onderste rij zijn de zonnevlammen die het SEC heeft gedetecteerd. De verticale strepen duiden de piek van de zonnevlam aan, de horizontale de duur van de zonnevlam.



Figuur 3.2: Een vergelijking tussen de door ons gedetecteerde zonnevlammen en het SEC op 7 juni 2003. De bovenste rij lijnen duiden op de zonnevlammen die wij gedetecteerd hebben, de onderste rij zijn de zonnevlammen die het SEC heeft gedetecteerd. De verticale strepen duiden de piek van de zonnevlam aan, de horizontale de duur van de zonnevlam.

metingen is mogelijk het begin van een zonnevlam als de voorgaande en de volgende verschillen groter zijn dan 10% van het gemiddelde. Deze voorwaarde bepaalt hoe snel de flux moet stijgen opdat de som in aanmerking komt om het begin van een zonnevlam te zijn. Als we deze waarde naar 9% terugbrengen dan nemen we 8% meer zonnevlammen waar. We vinden nu ongeveer 9700 zonnevlammen in plaats van 8953 in het eerste geval, waaronder ook de drie pieken van de X-zonnevlam op 13 september 2005 (figuur 3.3) en de C-zonnevlam op 7 juni 2003.

In tabel 3.1 staat de onderverdeling van het totale aantal zonnevlammen per X-stralen klasse. Door deze aanpassing zullen ook de begintijden van de door ons gedetecteerde zonnevlammen mogelijk vervroegen, waardoor ze beter overeenkomen met de SEC-catalogus.



Figuur 3.3: Met de aangepaste methode detecteren we wel de drievoudige X-zonnevlam (1, 2, 3) van 13 september 2005. De bovenste rij lijnen duiden op de zonnevlammen die wij gedetecteerd hebben, de onderste rij zijn de zonnevlammen die het SEC heeft gedetecteerd. De verticale strepen duiden de piek van de zonnevlam aan, de horizontale de duur van de zonnevlam.

klasse	aantal (lijst met 10%)	aantal (lijst met 9%)
A-zonnevlam	488	562
B-zonnevlam	4872	5409
C-zonnevlam	3151	3281
M-zonnevlam	373	374
X-zonnevlam	47	48
totaal aantal	8953	9674

Tabel 3.1: Het aantal zonnevlammen van iedere klasse dat we detecteren afhankelijk van de parameter. In de eerste kolom staat de X-stralen classificatie. De tweede kolom bevat het aantal zonnevlammen uit de catalogus die is opgesteld met de parameters op 20% en 10%. In de derde kolom staan de aantallen volgens de catalogus met de parameters 20% en 9%.

## 3.2 Gedetailleerde vergelijking van de twee catalogi

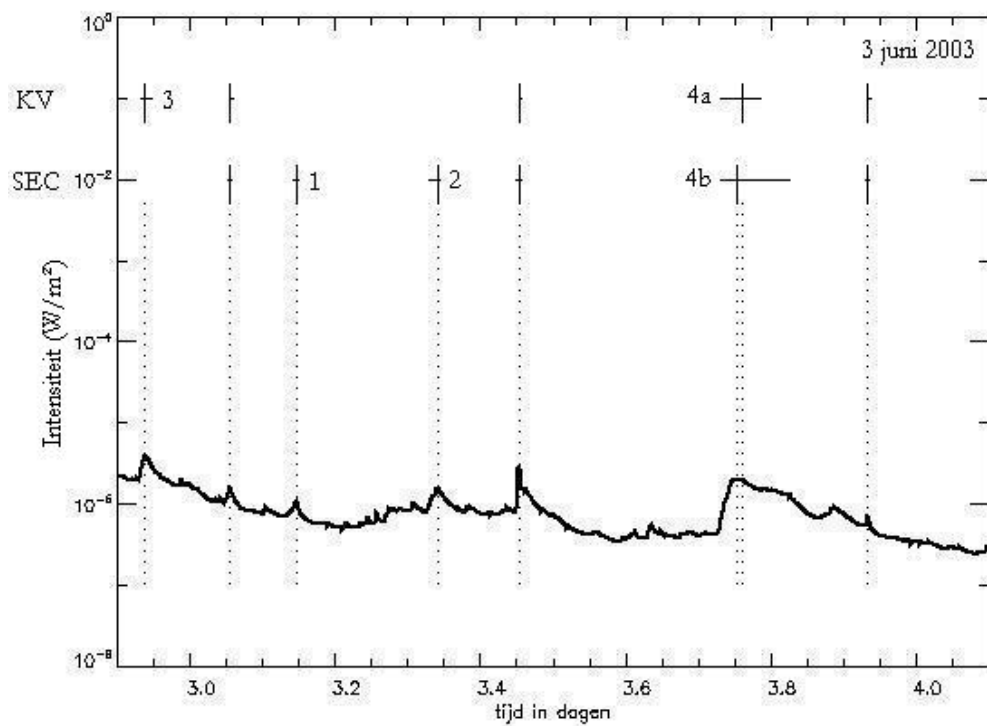
In de volgende delen zullen we de algemene verschillen tussen de twee catalogi bespreken. Ook gaan we de zonnevlammen die in beide catalogi voorkomen met elkaar vergelijken. Dit doen we door de piektijden naast elkaar te leggen en de duur van de zonnevlammen.

### 3.2.1 De algemene verschillen tussen de twee catalogi

In dit deel gaan we de algemene verschillen na. We bekijken in detail waarom we bepaalde zonnevlammen niet detecteren en het SEC wel en vice versa.

In figuur 3.4 zijn twee zonnevlammen (1 en 2) te zien die enkel door het SEC worden gedetecteerd. Wij vinden die niet als gevolg van onze opgelegde voorwaarden op de sterkte van de stijging van de flux. Voor zowel zonnevlam 1 als 2 wordt er een stijging in de flux van 20% gemeten door ons programma, maar de som van de twee verschillen van de fluxwaarden zijn niet groter dan 9% van het gemiddelde.

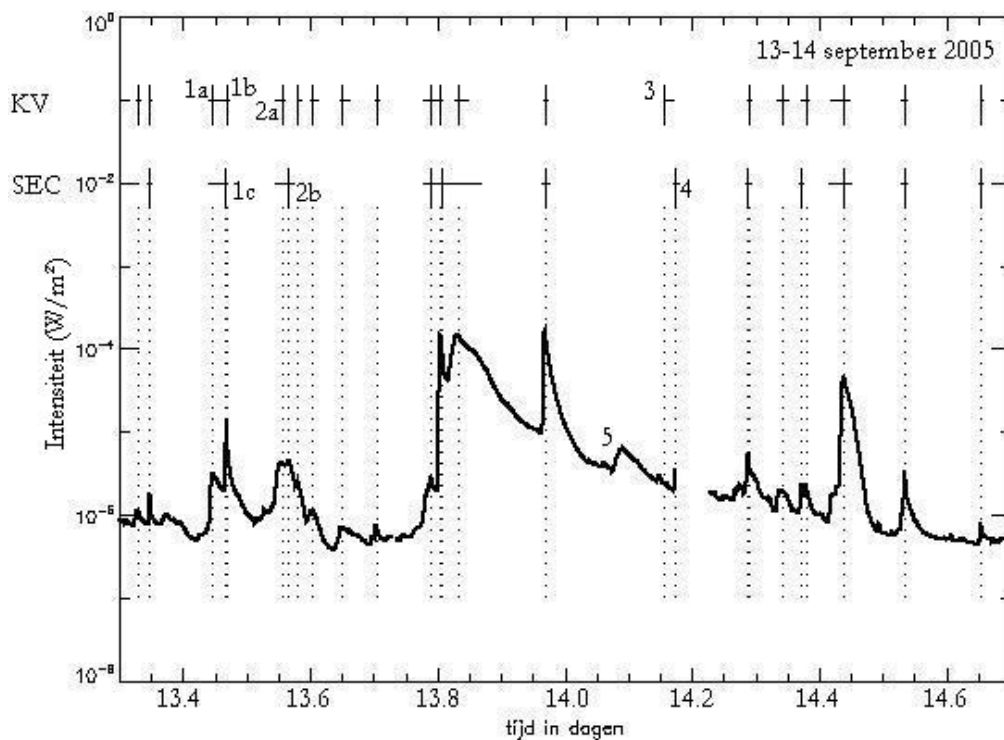
Op deze figuur is ook te zien dat wij de eerste zonnevlam (3) wel detecteren terwijl het SEC dit niet doet. Verder valt het op dat we beide zonnevlam 4 (4a en 4b) detecteren, maar dat de piektijd en de eindtijd duidelijk verschillen. Het verschil in piektijd is het gevolg van het feit dat de zonnevlam een afgeplat profiel heeft. In ons programma bepalen we de piektijd als het tijdstip waarop de grootte van de volgende meting strikt kleiner is. Het verschil in eindtijd is een gevolg van de fluctuaties. De gemeten flux daalt niet altijd even mooi, er kunnen kleine toenames zijn in de flux, terwijl



Figuur 3.4: Op deze figuur staan de zonnevlammen aangeduid die door ons en die door het SEC zijn gedetecteerd op 3 juni 2003. Men dient ermee rekening te houden dat de  $y$ -as een logaritmische schaal heeft. De bovenste rij lijnen duiden op de zonnevlammen die wij gedetecteerd hebben, de onderste rij zijn de zonnevlammen die het SEC heeft gedetecteerd. De verticale strepen duiden de piek van de zonnevlam aan, de horizontale de duur van de zonnevlam.



de flux in het algemeen daalt. Deze kleine toenames worden fluctuaties genoemd. Een tijdstip wordt in onze methode als de eindtijd genomen als de flux strikt groter is dan de helft van de som van de achtergrondstraling en de waarde van de flux op de piektijd, en als de volgende zes minuten een strikt grotere flux hebben. In onze berekeningen gebruiken we sommen van twee metingen om deze fluctuaties gedeeltelijk tegen te gaan. Zoals men kan zien op figuur 3.4 neemt de flux van de zonnevlam eerst duidelijk af om daarna een tijdje stabiel te blijven en vervolgens verder te dalen.



Figuur 3.5: Op deze figuur staan een aantal van de zonnevlammen van 13 en 14 september 2005. De bovenste rij lijnen duiden op de zonnevlammen die wij gedetecteerd hebben, de onderste rij zijn de zonnevlammen die het SEC heeft gedetecteerd. De verticale strepen duiden de piek van de zonnevlam aan, de horizontale de duur van de zonnevlam.

Op figuur 3.5 is te zien dat wij 2 zonnevlammen waarnemen (1a en 1b) terwijl het SEC deze twee als een geheel beschouwen (1c). Zonnevlam 2 (2a en 2b) is een ander voorbeeld van eenzelfde zonnevlam die door beide gevonden wordt, maar met een verschillende piektijd. Wij detecteren zonnevlam 3, maar het SEC doet dat niet. Zonnevlam 3 voldoet aan de door ons opgelegde

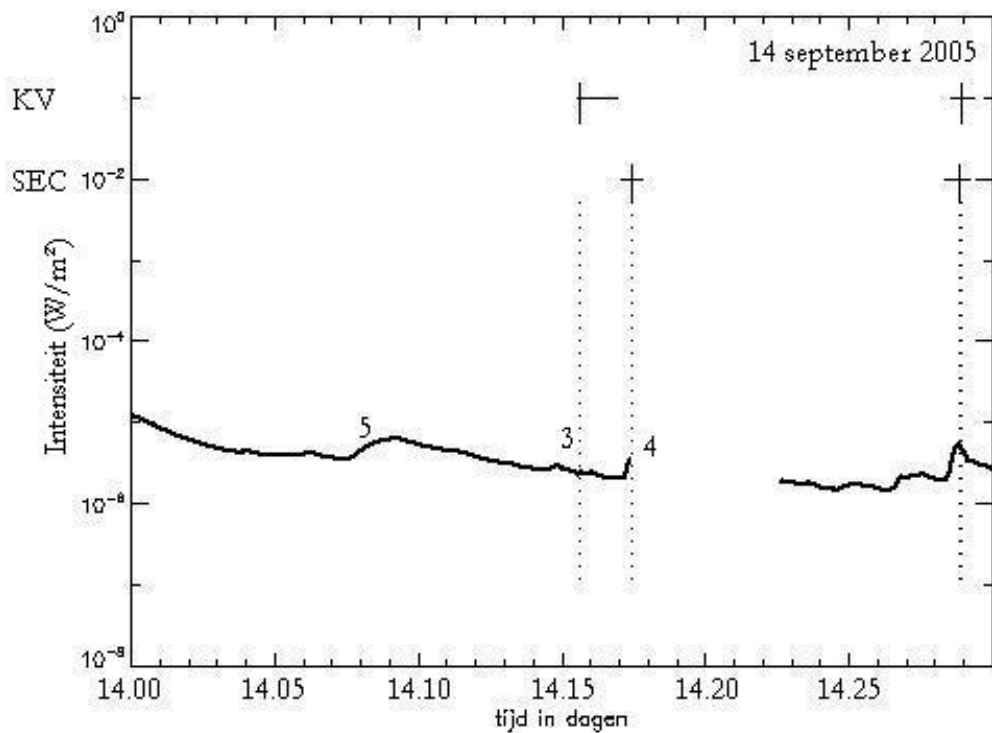
voorwaarden, vandaar dat ze gedetecteerd wordt. In figuur 3.6 is echter geen stijging te zien. In onze catalogus vinden we terug dat deze zonnevlam op 14 september 2005 om 3u52 begint, piekt om 3u53 en om 4u12 eindigt. Ze staat geclassificeerd als een C2.4 zonnevlam. Omdat er op figuur 3.6 niets te zien is kunnen we dit als een valse zonnevlam of valse detectie beschouwen. Verder zien we op de grafiek dat het SEC zonnevlam 4 heeft waargenomen, maar dat wij dat niet doen. Er is een duidelijke stijging van de flux te zien, dus is er een zonnevlam geweest. Dit vinden we ook terug in ons programma. We kunnen echter niet veel over deze zonnevlam zeggen omdat er zowel van de piek als van het einde geen metingen zijn. Daarom hebben wij er bewust voor gekozen om deze zonnevlammen niet op te nemen in onze catalogus. De zonnevlam wordt wel gedetecteerd door ons programma.

De duidelijke fluxtoename (5) voor zonnevlam 3 detecteren we geen van beide. Deze wordt niet door ons gedetecteerd omdat de toename te traag verloopt.

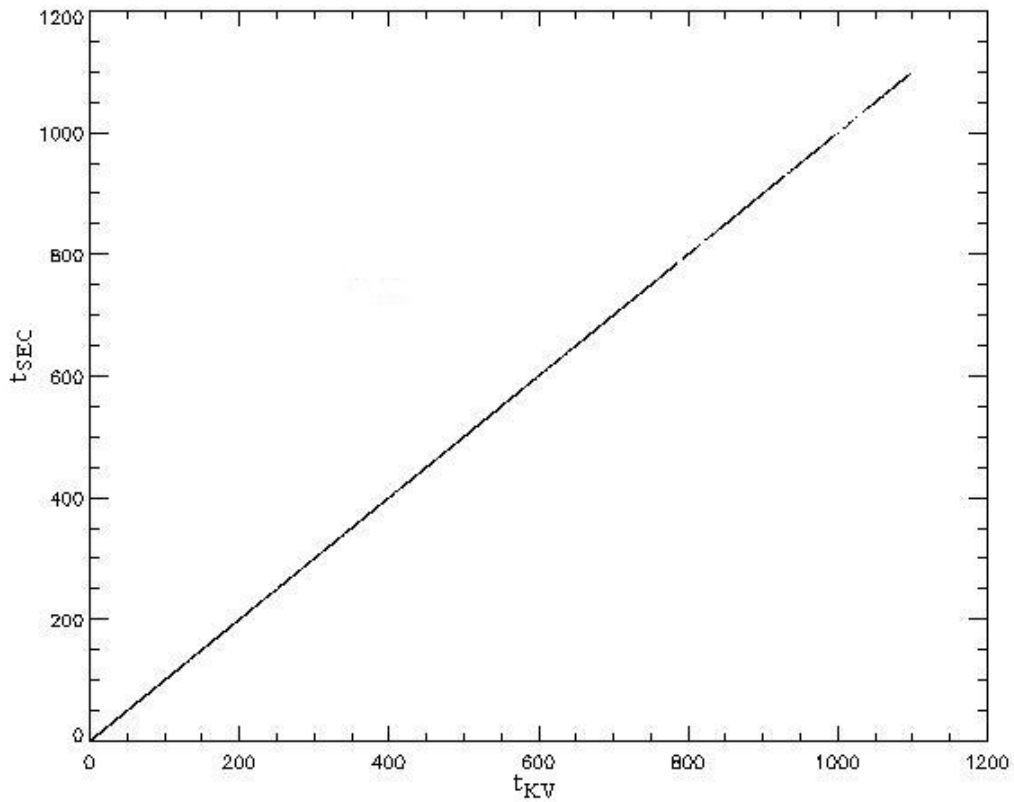
### **3.2.2 Het verschil in piektijden en duur van de gemeenschappelijke zonnevlammen**

Op de bovenstaande grafieken (figuur 3.4, 3.5 en 3.6) kan men zien dat het SEC niet altijd dezelfde zonnevlammen detecteert als wij. In dit deel gaan we enkel de zonnevlammen gebruiken die in beide catalogi voorkomen. We veronderstellen dat we het beiden over dezelfde zonnevlam hebben als de gevonden piektijden maximaal 10 minuten uit elkaar liggen. Nadat we een lijst hebben samengesteld met de gemeenschappelijke zonnevlammen, kunnen we de piektijden vergelijken. In het ideale geval zouden alle piektijden van de zonnevlammen die wij hebben gevonden, overeenkomen met de zonnevlammen die door het SEC zijn gedetecteerd. In de vorige paragraaf is gebleken dat dit niet het geval is. In het totaal vinden wij 9699 zonnevlammen tegenover 6809 zonnevlammen die door het SEC worden waargenomen over dezelfde periode. Een deel van dit verschil is te verklaren door het niet detecteren van A-zonnevlammen door het SEC. In totaal hebben we 6206 gemeenschappelijke zonnevlammen gevonden. In figuur 3.7 worden de door ons bepaalde de piektijden uitgezet tegenover deze van het SEC. De witte ruimtes in de lijn zijn periodes met weinig of geen zonnevlammen zoals bijvoorbeeld oktober 2005. Het ideale geval zou overeenkomen met de bissectrice. Het is duidelijk dat de piektijden niet veel verschillen. Daarom hebben we een andere grafiek gemaakt waarbij we op de  $y$ -as het verschil van de twee piektijden zetten (figuur 3.8).

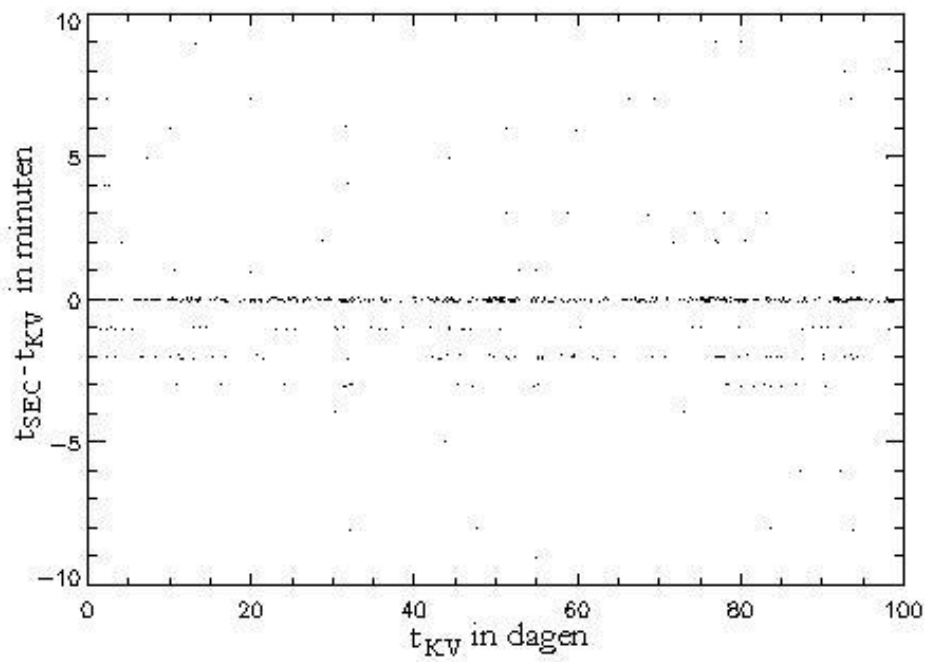
De afwijking van de piektijden van de bissectrice kan natuurlijk niet groot



Figuur 3.6: Dit is een close-up van zonnevlammen 3 en 4 en de fluxtoename (5) uit figuur 3.5 om deze zonnevlammen nog beter in detail te kunnen bestuderen. De bovenste rij lijnen duiden op de zonnevlammen die wij gedetecteerd hebben, de onderste rij zijn de zonnevlammen die het SEC heeft gedetecteerd. De verticale strepen duiden de piek van de zonnevlam aan, de horizontale de duur van de zonnevlam.



Figuur 3.7: Op de  $x$ -as staan de piektijden van de door ons gedetecteerde zonnevlammen in dagen ( $t_{KV}$ ) en op de  $y$ -as staan de piektijden van de door het SEC gedetecteerde zonnevlammen in dagen ( $t_{SEC}$ ). Enkel de gemeenschappelijke zonnevlammen zijn hiervoor gebruikt. Zowel op de  $x$ -as als de  $y$ -as komt 0 overeen met 1 januari 2003 en 1095 met 31 december 2005.



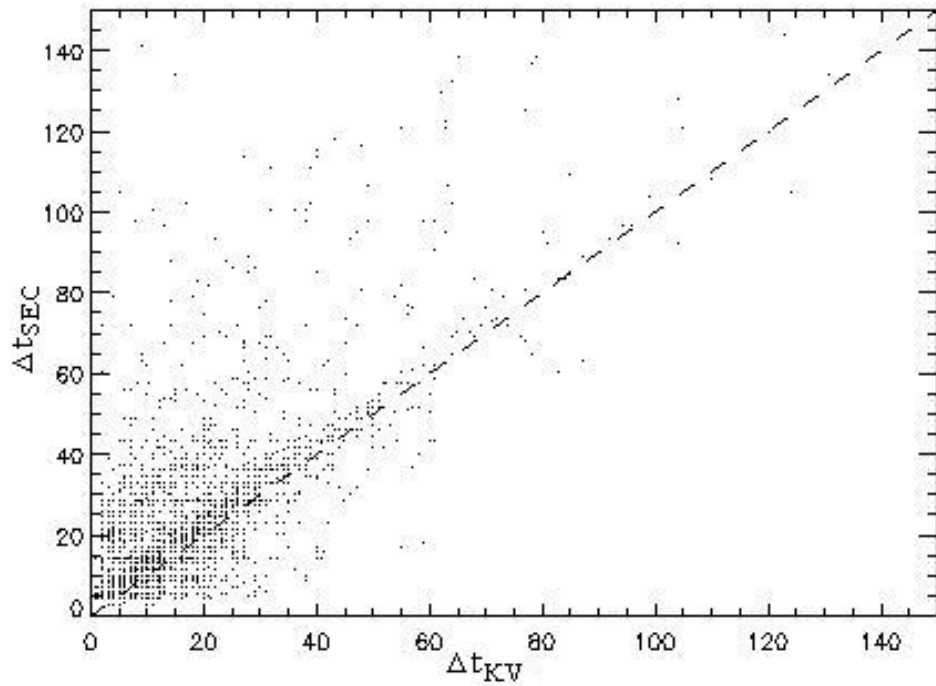
Figuur 3.8: Op de  $x$ -as staan terug de piektijden van de door ons gedetecteerde zonnevlammen in dagen ( $t_{KV}$ ) en op de  $y$ -as staan de verschillen van de piektijden in minuten van de door het SEC gevonden zonnevlammen ( $t_{SEC}$ ) en de onze ( $t_{KV}$ ). Op de  $x$ -as komt 0 overeen met 1 januari 2003.

zijn omdat we verondersteld hebben dat de piektijden maximaal 10 minuten mogen verschillen. Zoals te zien is op figuur 3.8 hebben de meeste zonnevlammen minder dan 1 minuut verschil.

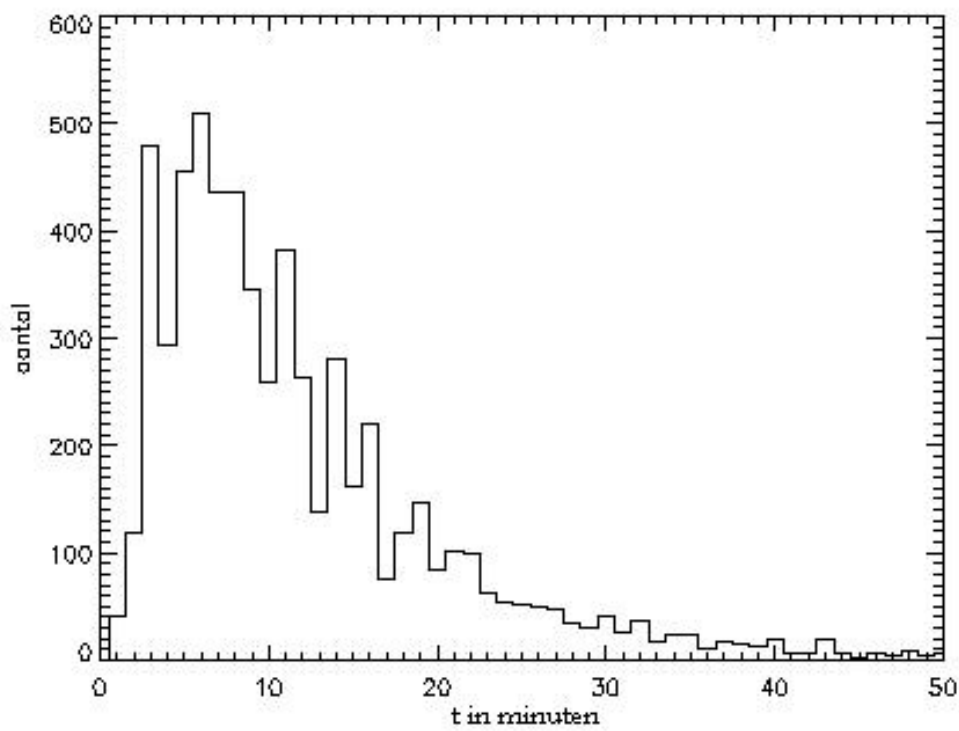
We kunnen natuurlijk het maximale verschil in piektijden vergroten naar 15 minuten of zelfs 20 minuten. Dit geeft een toename in het aantal gemeenschappelijke zonnevlammen (6274 met 15 minuten en 6330 met 20 minuten), maar het gevolg is dat we dan zonnevlammen die duidelijk niet dezelfde zijn toch als eenzelfde gebeurtenis gaan beschouwen.

In figuur 3.9 hebben we de duur van de zonnevlammen met elkaar vergeleken. In het ideale geval zou ook dit gelijk moeten zijn aan de bissectrice, maar zoals men kan zien, duurt eenzelfde zonnevlam gemiddeld enkele minuten langer bij het SEC. Alhoewel er ook zonnevlammen zijn die bij ons langer duren.

In de volgende twee grafieken (figuur 3.10 en figuur 3.11) is de verdeling van de duur van de gemeenschappelijke zonnevlammen van beide catalogi afzonderlijk te zien. De grafieken komen ongeveer overeen, behalve dat figuur 3.10 enkele minuten naar links is verschoven ten opzichte van figuur 3.11. Het valt ook op dat er in figuur 3.11 bij bepaalde duren systematisch weinig zonnevlammen zijn.

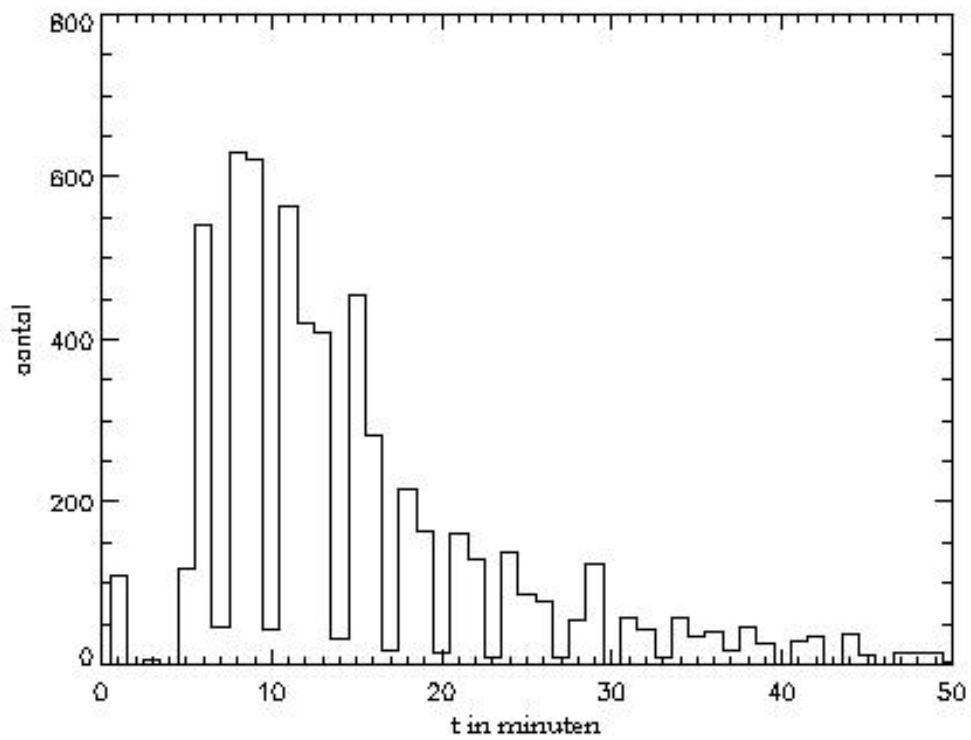


Figuur 3.9: We vergelijken de duur van eenzelfde zonnevlam die door ons en door het SEC wordt gedetecteerd. De tijd wordt in minuten weergegeven. Op de  $x$ -as staat de duur van de zonnevlammen die wij vinden ( $t_{KV}$ ). Op de  $y$ -as de duur van de door het SEC gedetecteerde zonnevlammen ( $t_{SEC}$ ). De twee parameters die in ons programma een zonnevlam bepalen staan voor deze grafiek op 20% en 9%.



Figuur 3.10: Op de  $x$ -as staat de duur ( $t$ ) van de zonnevlammen in minuten en op de  $y$ -as het aantal zonnevlammen in onze catalogus met die duur. We hebben enkel de gemeenschappelijke zonnevlammen gebruikt.





Figuur 3.11: Op de  $x$ -as staat de duur ( $t$ ) van de zonnevlammen in minuten en op de  $y$ -as het aantal zonnevlammen in de SEC-catalogus met die duur. Dit zijn wel enkel de gemeenschappelijke zonnevlammen.

### 3.2.3 Overzicht van de verschillen

Hieronder hebben we alle verschillen tussen de twee catalogi nog eens samen gezet.

- Onze detectie gebeurt automatisch terwijl het SEC dit zowel automatisch als manueel doet. Als bij het SEC een zonnevlam door meerdere observatoria wordt waargenomen, dan is er een operator die bepaalt welke gegevens in de catalogus komen. Bij ons voldoen de zonnevlammen dus steeds aan een bepaalde definitie die voortkomt uit de opgelegde detectievoorwaarden. Bij manuele detectie is het vinden van een zonnevlam persoonsafhankelijk. Verder is er geen strikte definitie die bepaalt welke stijging in flux een zonnevlam is en welke niet. De detectie gebeurt visueel.
- Het SEC detecteert geen A-zonnevlammen, zonnevlammen met een flux onder  $10^{-7} W/m^2$ , terwijl wij dit wel doen. Het is natuurlijk zo dat enkel tijdens een zonneminimum de achtergrondstraling onder het B-niveau valt en de fout op de metingen groot is bij een lage flux.
- Het is mogelijk dat tijdens de duur van een zonnevlam geen metingen meer gedaan worden (zie figuur 3.5 zonnevlam 4). In onze methode wordt dan ook geen zonnevlam gedetecteerd. Dat is een bewuste keuze omdat er niet veel te zeggen valt over de zonnevlam. We kunnen enkel het begin bepalen, maar er kan niets over de piek en het einde gezegd worden. Het SEC detecteert wel een zonnevlam.
- De definitie van een zonnevlam die wij gebruiken verschilt van die van het SEC. Bij onze detectie duurt een zonnevlam minstens 3 minuten terwijl een door het SEC gedetecteerde zonnevlam minstens 5 minuten duurt. Dit komt omdat zij het begin van een zonnevlam nemen als de eerste van 4 minuten waarin de flux sterk monotoon stijgt.
- Een gevolg van de verschillende definities is dat bij een door ons gedetecteerde zonnevlam de begintijd meestal enkele minuten later is dan in de SEC-catalogus (zie figuur 3.9). Soms kunnen de piektijden ook verschillen (zie figuur 3.4 zonnevlam 4a en 4b).
- Bij de bepaling van de eindtijden speelt de grootte van de achtergrondstraling een rol. Doordat wij de achtergrondstraling op een andere manier berekenen, kan deze een andere waarde hebben dan die door het SEC wordt gebruikt. Het SEC splitst elke dag in drie delen op. Ieder deel duurt dus 8 uur. Van deze delen berekenen ze de gemiddelde

X-stralen flux aan de hand van de 1-minuut metingen. De kleinste van deze drie waarden is dan de achtergrondstraling voor die dag. Wij nemen als achtergrondstraling de helft van het gemiddelde dat wij in ons programma berekenen. Hierdoor kunnen er verschillen zitten op de eindtijden (zie figuur 3.9).

Hoewel er redelijk wat verschillen zijn tussen de twee catalogi, hebben we geen slechte catalogus opgesteld. We mogen gerust zeggen dat onze methode om zonnevlammen automatisch te detecteren goed werkt. Er is natuurlijk wel nog verbetering mogelijk. De begintijden van onze zonnevlammen zijn systematisch enkele minuten later dan die van de zonnevlammen uit de SEC-catalogus. Hoewel de minuten die voor onze begintijd komen niet voldoen aan onze voorwaarden, behoren ze eigenlijk wel tot de zonnevlam.

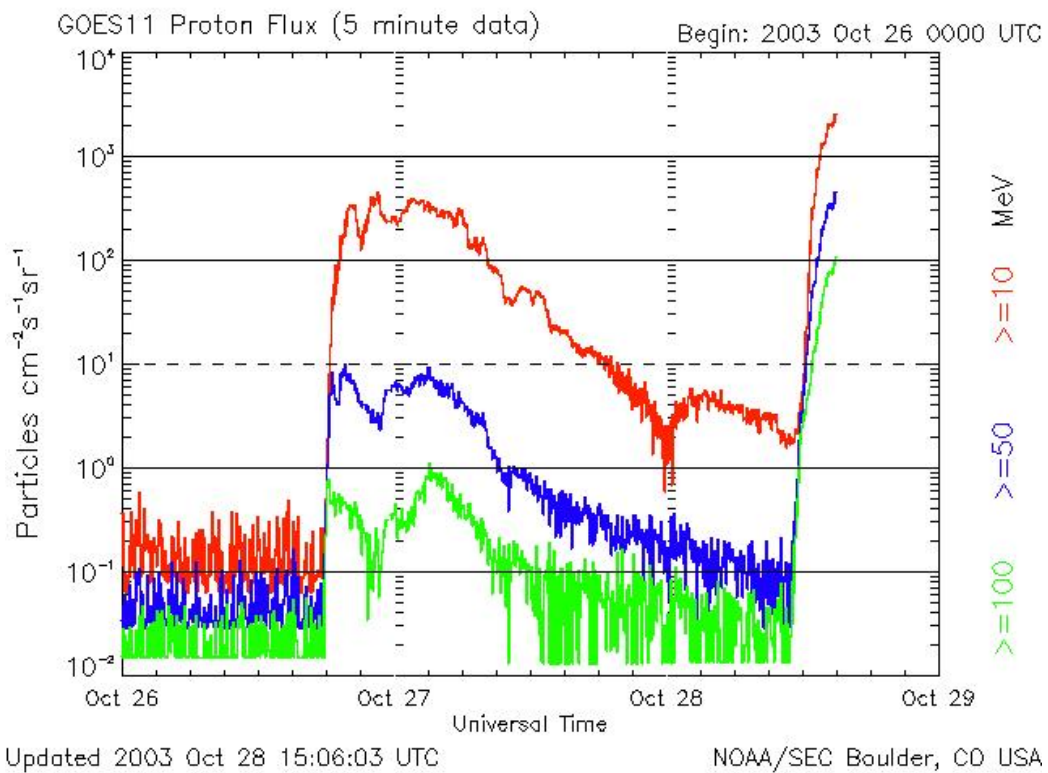
# Hoofdstuk 4

## De temperatuursafhankelijkheid van SEP-events

### 4.1 Detectie van SEP-events door het SEC

Het SEC (Space Environment Center) detecteert sinds 1976 SEP-events, dus vanaf de eerste GOES-satelliet. Al deze SEP-events worden samen gezet in een catalogus die op hun website is terug te vinden.

Het bepalen van een SEP-event gebeurt aan de hand van de gemeten proton flux (zie figuur 4.1). Door de jaren heen zijn er aan boord van de GOES-satellieten verschillende algoritmes gebruikt om deze proton flux te meten. De proton flux is de flux van deeltjes (protonen) met een energie groter dan 10 MeV. Iedere meting duurt 5 minuten. De protonenflux wordt voor drie verschillende soorten protonen gemeten: protonen met een energie groter dan 10 MeV, groter dan 50 MeV en groter dan 100 MeV. Het begin van een SEP-event wordt gedefinieerd door het SEC als de eerste meting van drie opeenvolgende metingen waarvan de flux groter of gelijk is aan 10 pfu. Dit wil dus zeggen dat een SEP-event minstens 15 minuten duurt. 1 pfu komt overeen met  $1 p/cm^2 s sr$ , dit is 1 deeltje per  $cm^2$  per seconde per steradiaal (ruimtehoek). Het einde van een SEP-event is de laatste meting waarop de flux groter of gelijk is aan 10 pfu. Er worden meer SEP-events gedetecteerd dan dat er in de catalogus vermeld worden. Dit komt bijvoorbeeld doordat een SEP-event eindigt als de protonenflux kleiner is dan 10 pfu. Het is echter mogelijk dat direct daarna de flux terug stijgt en er een nieuw SEP-event gedetecteerd wordt. Hoewel er twee SEP-events waargenomen worden zal het in de catalogus als één SEP-event vermeld worden. De begintijd is dan het begin van het eerste SEP-event en de eindtijd het einde van het tweede SEP-event.



Figuur 4.1: De drie soorten protonenflux in pfu uitgezet in de tijd. Er is te zien dat op 26 oktober 2003 om iets na 18u de flux groter dan 10 pfu was, en er dus een SEP-event gedetecteerd is.

In de catalogus staan de SEP-events per jaar bijeen. Voor iedere gebeurtenis wordt het begin en het einde vermeld in UT (universele tijd of Greenwich tijd) (zie tabel 4.1). Vervolgens geeft men de maximale proton flux in pfu. Sinds 1996 wordt de bijhorende CME gegeven, de data van deze CME's zijn afkomstig van SOHO. Verder wordt datum en piektijd van de geassocieerde zonnevlam vermeld, samen met de X-stralen classificatie en eventueel ook de optische classificatie. Als laatste wordt de locatie op het zonneoppervlak en het nummer van het actieve gebied gegeven.

begin	einde	max. flux (in pfu)	CME
Jan 16/0210	Jan 17/1750	5040	Halo/15/2306
May 14/1525	May 15/1120	3140	Halo/13/1722
Jun 16/2200	Jun 17/0500	44	W/16 2003
Jul 14/0245	Jul 15/0345	134	Halo/13/1430
Jul 27/2300	Jul 29/1715	41	Halo/27/0454
Aug 22/2040	Aug 23/1045	330	Halo/22/1730
Sep 08/0215	Sep 11/0425	1880	E/07 1723

zonnevlam	klasse	locatie	nummer actief gebied
Jan 15/2302	X2	N15W05	10720
May 13/1657	M8	N12E11	10759
Jun 16/2002	M4	N09W87	10775
Jul 13/1449	M5	N10W80	10786
Jul 17/0502	M3	N11E90	10792
Aug 22/1727	M5/1N	S12W60	10798
Sep 07/1740	X17/3B	S06E89	10808

Tabel 4.1: In deze tabel staan alle SEP-events van 2005 die het SEC heeft gemeld.

## 4.2 De temperatuur van een zonnevlam

Het bepalen van de temperatuur van een zonnevlam gebeurt aan de hand van de intensiteit van de uitgezonden X-stralen. Volgens de wet van Planck voor een zwarte straler

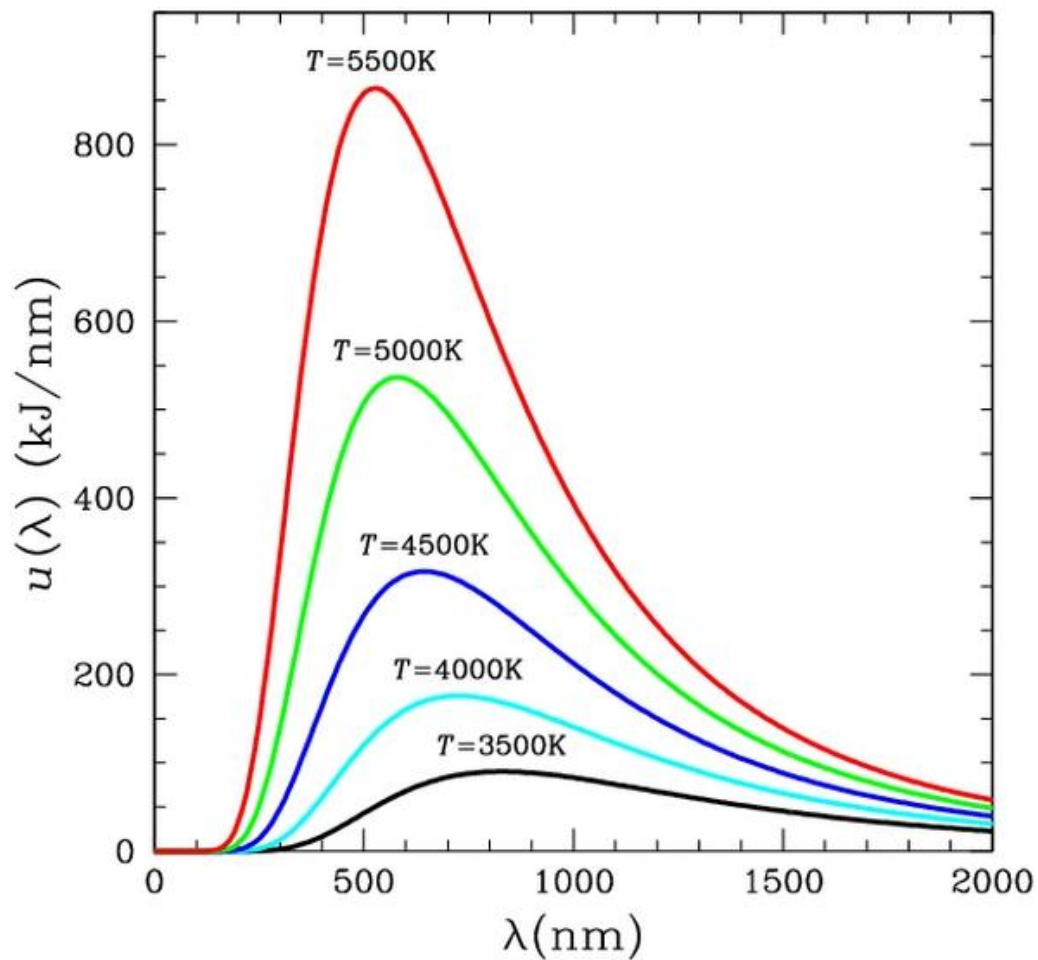
$$I(\nu, T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}$$

is de intensiteit bij een bepaalde golflengte of frequentie afhankelijk van de temperatuur. Naarmate de temperatuur stijgt zal de intensiteit van de korte

golf lengten groter worden (zie figuur 4.2). De energiedichtheid  $u(\nu, T)$  is evenredig met de intensiteit  $I(\nu, T)$ .

$$u(\nu, T) = \frac{4\pi}{c} I(\nu, T)$$

Deze methode is een ruwe benadering van de echte temperatuur omdat we ervan uitgaan dat een zonnevlam een zwarte straler is.



Figuur 4.2: In deze grafiek zijn enkele spectra van een zwarte straler te zien bij verschillende temperaturen. Op de  $y$ -as staat de energiedichtheid  $u(\nu, T)$ .

## 4.3 De temperatuursafhankelijkheid van SEP-events

Niet alle zonnevlammen worden met een SEP-event geassocieerd. Zonnevlammen zonder SEP-event zullen we voortaan 'gewone' (*Eng.: normal*) zonnevlammen noemen. Deze geassocieerd met een event noemen we SEP-zonnevlammen.

In het vorige deel (sectie 4.2) hebben we uitgelegd dat de temperatuur van een zonnevlam bepaald kan worden door de wet van Planck te gebruiken. Dit is geen gemakkelijke berekening omdat er rekening moet gehouden worden met de eigenschappen van de satelliet. Hiermee bedoelen we de efficiëntie van de ionenkamer die de stroom meet, de methode waarmee deze stroom wordt omgezet in intensiteit. We mogen natuurlijk ook niet vergeten dat de gebruikte metingen slechts de intensiteiten zijn op 1 AE van de zon en dus niet die aan het zonneoppervlak. Daarom gebruiken we een andere manier om de temperatuur te bepalen. We gaan de temperatuur van een zonnevlam bepalen door de verhouding van de maximale intensiteit van de lange en de korte golflengte te gebruiken. Ook dit is niet eenvoudig, maar in SolarSoft bestaat er een programma dat de berekening van de temperatuur voor ons doet (`goes_chianti_tem`). Hoe deze berekening gedaan wordt, is nergens uitgelegd. In de papers geschreven door Garcia (ref. [5], [6]) wordt er enkel een tabel gegeven met temperaturen gelinkt aan de verhouding van de intensiteiten van de golflengten.

### 4.3.1 Eerder bekomen resultaten

Uit onderzoek gedaan door Garcia (ref. [6]) zijn er mogelijk verschillende temperatuursafhankelijkheden voor gewone zonnevlammen en SEP-zonnevlammen. Garcia heeft data aangeboden door het SEC, van 1977 tot 1991 gebruikt, maar niet alle metingen zijn even goed. Voor 1984 zijn er zeer weinig gewone zonnevlammen onder de M8. En tussen 1984 en 1988 zijn er bijna geen gewone zonnevlammen in zijn resultaten verwerkt. Pas vanaf 1988 zijn de gegevens vollediger en betrouwbaarder. Alle zonnevlammen worden aan de hand van de intensiteit van de lange golflengte uitgezet ten opzichte van hun temperatuur. Garcia komt tot de conclusie dat de distributie van SEP-zonnevlammen en gewone zonnevlammen overlapt bij hoge temperatuur en hoge intensiteit. Bij lage temperatuur en lage intensiteit divergeren de twee distributies.



### 4.3.2 Onze resultaten

Wij hebben de SEP-events die tijdens 2003-2005 hebben plaatsgevonden en vermeld zijn in de SEC-catalogus gebruikt. Zoals reeds gezegd, wordt er aan ieder SEP-event een zonnevlam geassocieerd. We associëren telkens een zonnevlam uit onze catalogus met een SEP-event. Dit gebeurde manueel vermits er maar 19 events plaatsvonden tijdens de betreffende periode. Hiervoor hebben we ons gebaseerd op de zonnevlam die het SEC meegeeft en de overeenkomstige in onze catalogus gezocht. Nadat we de temperatuur van alle zonnevlammen hebben berekend, kunnen we de sterkte van de lange golflengte uitzetten ten opzichte van deze temperatuur. Omdat SEP-zonnevlammen meestal groter zijn dan C5-zonnevlammen beperken wij ons tot het C-niveau en hoger.

Daarna kunnen we een rechte door alle zonnevlammen fitten en een door de SEP-zonnevlammen. We nemen geen fit door de gewone zonnevlammen omdat het aantal SEP-zonnevlammen zeer klein is (19) ten opzichte van alle zonnevlammen (3703). Deze rechten worden aan de hand van de kleinste kwadraten methode bepaald. Stel dat er  $n$  zonnevlammen zijn waardoor er een rechte moet komen:

$$\begin{aligned} y_{i0} &= \text{de temperatuur van de } i\text{-de zonnevlam} \\ y_{ic} &= \text{de temperatuur van die de } i\text{-de zonnevlam} \\ &\quad \text{zou hebben als ze op de rechte zou liggen} \\ \chi &= \sum_{i=1}^n (y_{i0} - y_{ic})^2 \end{aligned}$$

De beste rechte is dan deze waarvoor  $\chi$  het kleinste is. In IDL is er een commando dat de beste rechte voor ons bepaalt. Als we dit toepassen op onze gegevens dan krijgen we vier getallen terug:

- A = het snijpunt met de  $y$ -as
- B = de richtingscoëfficiënt
- $\sigma_A$  = de fout op A
- $\sigma_B$  = de fout op B

In ons geval is de gevonden rechte dan gelijk aan:

$$y_{ic} = A + B * \log(x_i)$$

We moeten het logaritme nemen van de intensiteit van de lange golflengte omdat de  $x$ -as een logaritmische schaal heeft.

In figuur 4.3 is het bekomen resultaat weergegeven. De rechte door alle zonnevlammen wordt door de volgende functie weergegeven:

$$y_{nor} = A_{nor} + B_{nor} * \log(x_{nor}) \quad \text{met}$$

$$A_{nor} = 35.0408$$

$$B_{nor} = 4.3955$$

en de rechte door de SEP-zonnevlammen door:

$$y_{SEP} = A_{SEP} + B_{SEP} * \log(x_{SEP}) \quad \text{met}$$

$$A_{SEP} = 30.3592$$

$$B_{SEP} = 3.73938$$

De fouten op deze waarden zijn:

$$\sigma_{A_{nor}} = 0.273371$$

$$\sigma_{B_{nor}} = 0.0493276$$

$$\sigma_{A_{SEP}} = 2.55158$$

$$\sigma_{B_{SEP}} = 0.615085$$

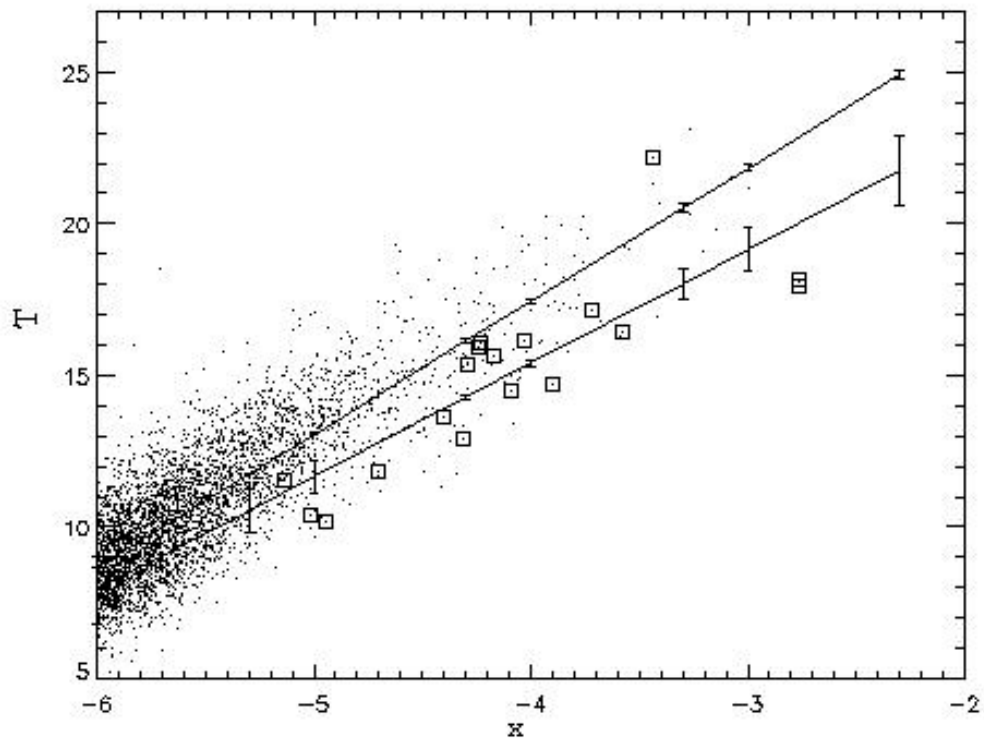
Doordat er slechts 19 SEP-events in deze grafiek verwerkt zijn, zijn er geen veelzeggende besluiten te trekken. Daarenboven is de fout op de rechte door de SEP-zonnevlammen redelijk groot.

Er is een duidelijk verschil in de distributies. De bovenste rechte is de fit door alle zonnevlammen en de onderste de fit door de zonnevlammen geassocieerd aan een SEP-event. Als we een rechte door de gewone zonnevlammen hadden getrokken in plaats van door alle zonnevlammen, dan zou de bovenste rechte een klein beetje hoger liggen. Dit is echter verwaarloosbaar.

Garcia concludeerde dat bij lage temperatuur en lage intensiteit er een duidelijk verschil is tussen de gewone zonnevlammen en de SEP-zonnevlammen. De SEP-zonnevlammen liggen lager dan de gewone. Bij hoge temperatuur en hoge intensiteit is er geen verschil in temperatuursdistributie.

Wij bekomen echter dat bij lage temperatuur en lage intensiteit er geen verschil is in de temperatuursdistributie van gewone en SEP-zonnevlammen. Bij hoge temperatuur en hoge intensiteit is er wel een verschil in de verdeling. Dan liggen de SEP-zonnevlammen lager dan de gewone.

Wij vinden dus net zoals Garcia een verschil in de temperatuursverdeling van de zonnevlammen, maar onze resultaten zijn tegenstrijdig.



Figuur 4.3: De vierkantjes zijn de SEP-zonnevlammen en de puntjes zijn de gewone zonnevlammen. Op de  $x$ -as staat het 10-logaritme van de maximale intensiteit van de lange golflengte. De  $y$ -as geeft de temperatuur in miljoen Kelvin. De bovenste rechte is de kleinste kwadraten fit door de gewone zonnevlammen en de onderste die door de SEP-zonnevlammen. De verticale lijntjes op deze rechten geven de fouten op de rechten weer.

# Besluit

We hebben twee verschillende methodes besproken om zonnevlammen automatisch te detecteren. De eerste methode hebben we niet volledig uitgewerkt omdat al snel bleek dat ze niet naar behoren werkt. De tweede methode werkt wel maar had nog enkele aanpassingen nodig. Dit hebben we gedaan aan de hand van een parameteranalyse.

Daarna hebben we onze catalogus naast de SEC-catalogus gelegd. Hieruit blijkt dat wij meer en andere zonnevlammen detecteren dan het SEC. Dit is een gevolg van de strikte beginvoorwaarden die wij opleggen, terwijl het SEC naast automatisch detecties ook manuele waarnemingen in hun lijst opnemen. En er is natuurlijk het verschil in minimale duur. Bij ons duurt een zonnevlam minstens 3 minuten terwijl het SEC pas een zonnevlam detecteert als deze 5 minuten duurt. We mogen ook niet vergeten dat wij A-zonnevlammen detecteren en het SEC dit niet doet. Dit geeft enkel een verschil tijdens een zonneminimum omdat in die periode de achtergrondstraling laag genoeg is. Tijdens actievere periodes ligt de achtergrondstraling in het B-niveau of zelfs het C-niveau. Dit maakt dan het waarnemen van A-zonnevlammen onmogelijk.

Daarnaast is ook gebleken dat hoewel de piektijden van de gemeenschappelijke zonnevlammen redelijk overeenkomen, de meeste piektijden verschillen maximum 1 minuut, de duur sterk kan verschillen. Het verschil in begintijd komt wederom door de voorwaarden die wij aan de begintijd opleggen waardoor de zonnevlam vaak al enkele minuten bezig is. De eindtijden worden mee bepaald door de waarde van de achtergrondstraling. Omdat er een verschil zit tussen onze berekening ervan en de manier waarop het SEC deze bepaald, krijgen we een andere waarde voor de achtergrondstraling en dus verschillende eindtijden.

Uit al deze vergelijkingen kunnen we besluiten dat onze automatisch aangelegde catalogus een goed begin is, maar dat er nog verbetering mogelijk is. Het is duidelijk dat onze begintijden te laat zijn en dus vervroegd moeten worden. Maar daarnaast detecteren wij de zonnevlammen volgens strikte voorwaarden. Daarenboven detecteren wij zonnevlammen die het SEC niet

detecteert, maar zelfs op het zicht in aanmerking moeten komen. Een voorbeeld hiervan is de drievoudige X-zonnevlam op 13-14 september 2005.

Het SEC detecteert ook automatisch, maar vult hun catalogus manueel aan. Hierdoor voldoen niet alle zonnevlammen aan strikte voorwaarden. Met het oog op de toekomst, gaat de voorkeur uit naar een catalogus die volledig automatisch wordt aangelegd omdat dit sneller kan gebeuren en omdat alle zonnevlammen dan aan dezelfde voorwaarden moeten voldoen.

In het laatste hoofdstuk hebben we de temperatuursdistributie van gewone zonnevlammen vergeleken met die van SEP-zonnevlammen. Hoewel we maar weinig SEP-zonnevlammen hebben gebruikt, worden de bevindingen van Garcia tegengesproken. De distributies van de gewone en de SEP-zonnevlammen zijn ook in onze resultaten duidelijk verschillend, maar wij vinden dat de gewone en de SEP-zonnevlammen samenvallen bij lage temperatuur en lage intensiteit. Bij hoge temperatuur en hoge intensiteit verschillen hun distributies duidelijk. Dit is in tegenspraak met het resultaat dat Garcia bekomt, hij vindt net het omgekeerde.

# Bibliografie

## Literatuur

- [1] Berghmans, D., Delouille, V., & de Patoul, J. (2006). Modeling and prediction of solar flares using statistical models. *z.u.*, z.p.
- [2] Biskamp, D. (1993). *Nonlinear Magnetohydrodynamics*. Cambridge: Cambridge University Press.
- [3] Crosby, N., Georgoulis, M., & Vilmer, N. (1999). A Comparison Between Statistical Properties of X-ray Flares and Predictions of The Statistical Flare Model. *8th SOHO Workshop: Plasma Dynamics and Diagnostics in the Solar transition Region and Corona*, pp.247-250
- [4] Crosby, N., Vilmer, N., Lund, N., e.a., (1998). Deka-keV X-ray observations of Solar bursts with WATCH/GRANAT: frequency distributions of burst parameters. *Astronomy and Astrophysics*, 334, pp. 299-313.
- [5] Garcia, H. A., (1994), Temperature and Emission Measure From GOES Soft X-ray Measurements. *Solar Physics*, 154, pp. 275-308.
- [6] Garcia, H. A., (1994). Temperature and Hard X-ray Signature For Energetic Proton Events. *The Astrophysical Journal*, 420, pp. 420-432.
- [7] Golub, L., & Pasachoff, J. M. (1997). *The Solar Corona*. Cambridge: Cambridge University Press.
- [8] Kecskeméty, K., Daibog, E. I., Kahler, S., e.a., (2003). Some Statistical properties of the Decay Phase of SEP-events. *28th International Cosmic Ray Conference*, pp. 3503-3506.
- [9] Lang, K. R. (1995). *Sun, Earth And Sky*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.

- [10] Priest, E. R. (1981). *Solar Flare Magnetohydrodynamics*. New York: Gordon and Breach.
- [11] Stix, M. (2004). *The Sun*. Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag.
- [12] Švestka, Z. (1976). *Solar Flares*. Dordrecht: Reidel.
- [13] Tandberg-Hanssen, E., & Emslie, A. G. (1988). *The physics of solar flares*. Cambridge: Cambridge University Press.
- [14] Veronig, A., Temmer, M., Hanslmeier, A., e.a., (2002). Temporal aspects and frequency distributions of solar soft X-ray flares. *Astronomy and Astrophysics*, 382, pp. 1070-1080.
- [15] White, S. M., Thomas, R. J., & Schwartz, R.A. (2005). Updated Expressions for Determining Temperatures and Emission Measures from GOES Soft X-ray Measurements. *Solar Physics*, 227, issue 2, pp. 231-248.

## Websites

- [16] 40+ Years of Earth Science - The Geostationary Operational Environmental Satellite Program.  
[<http://www.earth.nasa.gov/history/goes/goes.html>].
- [17] A flare catalog.  
[<http://soi.stanford.edu/results/SolPhys200/Hudson/2000/000630/000630.html>].
- [18] BATSE Solar flare Server.  
[[http://umbra.nascom.nasa.gov/batse/batse\\_years.html](http://umbra.nascom.nasa.gov/batse/batse_years.html)].
- [19] BIMA Home Page.  
[<http://bima.astro.umd.edu/>].
- [20] CARMA Inyo [Public Resources].  
[<http://www.mmarray.org/>].
- [21] Catalogue of Unusual Phenomena in the Solar Radio Emission at 210 MHz Frequency within 1957-1967.  
[<http://www.acnet.ge/maqandarashvili.html>].

- [22] Centrum voor Plasma Astrofysica, K.U.Leuven.  
[<http://wis.kuleuven.be/cpa/index.php>].
- [23] CGRO Science Support Center.  
[<http://coss.c.gsfc.nasa.gov/docs/cgro/index.html>].
- [24] Comptel Solar Flare Catalog.  
[<http://www.gro.unh.edu/users/grank/catalog.html>].
- [25] D Region Absorption Documentation.  
[[http://www.sec.noaa.gov/rt\\_plots/dregionDoc.html](http://www.sec.noaa.gov/rt_plots/dregionDoc.html)].
- [26] EGSO SEC - GUI.  
[[http://sec.ts.astro.it/sec\\_ui.php](http://sec.ts.astro.it/sec_ui.php)].
- [27] Electromagnetic Spectrum.  
[<http://www.twcac.org/Tutorials/electromagnetic%20spectrum.htm>].
- [28] ETHZ RAPP: Catalogues.  
[<http://www.astro.phys.ethz.ch/rapp/catalog/catalog.html>].
- [29] [ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/SOLAR\\_DATA/Satellite\\_ENVIRONMENT/PARTICLES/p\\_events.lst](ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/SOLAR_DATA/Satellite_ENVIRONMENT/PARTICLES/p_events.lst).
- [30] Geostationary Operational Environmental Satellite.  
[<http://www.oso.noaa.gov/goes/index.htm>].
- [31] GOES I-M DataBook.  
[<http://rsd.gsfc.nasa.gov/goes/text/goes.databook.html>].
- [32] GOES Information and History.  
[<http://www.oso.noaa.gov/history/operational.htm>].
- [33] GOES Launch.  
[<http://www.osd.noaa.gov/GOES/goes-launch.htm>].
- [34] GRANAT Home Page.  
[<http://hea.iki.rssi.ru/GRANAT/granat.html>].
- [35] HESSI Flare Catalog Widget.  
[[http://hesperia.gsfc.nasa.gov/ssw/hessi/doc/gui\\_flarecat\\_help.htm](http://hesperia.gsfc.nasa.gov/ssw/hessi/doc/gui_flarecat_help.htm)].
- [36] High Altitude Observatory.  
[<http://www.hao.ucar.edu/site.html>].
- [37] <http://www.sec.noaa.gov/ftplib/indices/events/README>.



- [38] <http://www.sec.noaa.gov/ftplib/lists/xray/README>.
- [39] IDL cookbook (Morisset, IA/UNAM).  
[[http://132.248.1.102/~morisset/idl\\_cours/IDL/index\\_local.htm](http://132.248.1.102/~morisset/idl_cours/IDL/index_local.htm)].
- [40] IDL Reference for Beginners.  
[<http://www.usm.lmu.de:81/people/puls/lessons/numpraktnew/intro/idlref.pdf>].
- [41] Imagine the Universe! Dictionary.  
[[http://imagine.gsfc.nasa.gov/docs/dict\\_ei.html](http://imagine.gsfc.nasa.gov/docs/dict_ei.html)].
- [42] Introduction to IDL.  
[<http://www.astro.virginia.edu/class/oconnell/astr511/IDLguide.html>].
- [43] Ion chambers.  
[[http://van.hep.uiuc.edu/van/qa/section/Electricity\\_and\\_Magnets/Stuff\\_that\\_Sparks/948153771.htm](http://van.hep.uiuc.edu/van/qa/section/Electricity_and_Magnets/Stuff_that_Sparks/948153771.htm)].
- [44] Ion Chambers.  
[[http://www.adc9001.com/index.php?src=standard\\_ionchambers](http://www.adc9001.com/index.php?src=standard_ionchambers)].
- [45] IPS - The Sun and Solar Activity - Solar Flare Patrol.  
[<http://www.ips.gov.au/Educational/2/5/2>].
- [46] Living With A Star: Understanding Connections Between the Sun and Earth.  
[[http://ds9.ssl.berkeley.edu/LWS\\_GEMS/index.htm](http://ds9.ssl.berkeley.edu/LWS_GEMS/index.htm)].
- [47] Max Millennium Flare Catalog.  
[[http://orpheus.nascom.nasa.gov/~zarro/gbo/gbo\\_form.html](http://orpheus.nascom.nasa.gov/~zarro/gbo/gbo_form.html)].
- [48] NASA - GOES-N.  
[[http://www.nasa.gov/mission\\_pages/goes-n/main/index.html](http://www.nasa.gov/mission_pages/goes-n/main/index.html)].
- [49] NASA Sun-Earth Connection Media Viewer: Live Solar Images.  
[<http://ds9.ssl.berkeley.edu/viewer/flash/index.html>].
- [50] NASA's Cosmos.  
[[http://ase.tufts.edu/cosmos/view\\_picture.asp?id=178](http://ase.tufts.edu/cosmos/view_picture.asp?id=178)].
- [51] Op 11 augustus wordt het donker!  
[<http://www.eurospacecenter.be/nleclips.htm>].
- [52] Our Sun: the view from outside.  
[[http://spiff.rit.edu/classes/phys230/lectures/sun\\_gross/sun\\_gross.html](http://spiff.rit.edu/classes/phys230/lectures/sun_gross/sun_gross.html)].

- [53] Primer on the Solar Space Environment.  
[<http://www.sec.noaa.gov/primer/primer.html>].
- [54] Radiation Belts.  
[<http://www-spof.gsfc.nasa.gov/Education/Iradbelt.html>].
- [55] Ruimteweer.  
[<http://members.chello.be/j.janssens/Ruimteweer.html>].
- [56] SEC's Anonymous FTP Server Plots of Solar-Geophysical Data 3-day GOES X-ray Flux Plots.  
[<http://www.sec.noaa.gov/ftpmenu/plots/xray.html>].
- [57] SIDC-Solar Influences Data Analysis Center.  
[<http://www.sidc.oma.be/>].
- [58] SMEX History.  
[<http://sunland.gsfc.nasa.gov/smex/history/index.html>].
- [59] SOHO Extreme Ultraviolet Imaging Telescope (EIT).  
[<http://umbra.nascom.nasa.gov/eit/#CONTENT>].
- [60] Solar Cycle.  
[<http://www.oulu.fi/~spaceweb/textbook/cycle.html>].
- [61] Solar Eclipse photo Gallery 2.  
[<http://www.mreclipse.com/SEphoto/SEgallery2.html>].
- [62] Solar Energetic Particle (SEP) Model in CREME96.  
[<https://creme96.nrl.navy.mil/cm/SEP.htm>].
- [63] Solar Flare Theory.  
[<http://hesperia.gsfc.nasa.gov/sftheory>].
- [64] Solar Max 2000!  
[<http://spacekids.hq.nasa.gov/osskids/solarmax2000.html>].
- [65] SolarSoft - Description.  
[[http://ydac.mssl.ucl.ac.uk/sswdoc/solarsoft/ssw\\_whatitis.html](http://ydac.mssl.ucl.ac.uk/sswdoc/solarsoft/ssw_whatitis.html)].
- [66] Space Environment Center.  
[<http://www.sec.noaa.gov/>].
- [67] Space Weather and the Stereo Mission.  
[<http://stereo.nrl.navy.mil/swx/swoverview.html>].

- [68] SPACE.com – Space Weather and Solar Weather FAQ.  
[[http://www.space.com/spacewatch/solar\\_faq.html#u2](http://www.space.com/spacewatch/solar_faq.html#u2)].
- [69] Sunspot Magnetic Classification.  
[<http://www.spaceweather.com/glossary/magneticclasses.html>].
- [70] Superflares could kill unprotected astronauts.  
[<http://www.newscientist.com/article.ns?id=dn7142>].
- [71] swas home page.  
[<http://sunland.gsfc.nasa.gov/smex/swas/>].
- [72] SWAS Home Page.  
[<http://www.cfa.harvard.edu/swas/>].
- [73] The Granat Observatory.  
[<http://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/granat/granat.html>].
- [74] The International Gamma-Ray Astrophysics Laboratory (INTEGRAL).  
[<http://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/integral/integral.html>].
- [75] The Solar and Heliospheric Observatory.  
[<http://sohowww.nascom.nasa.gov/>].
- [76] The Solar Maximum Mission.  
[<http://science.nasa.gov/ssl/pad/solar/smm.htm>].
- [77] The WATCH solar X-ray burst catalogue.  
[<http://aanda.u-strasbg.fr:2002/articles/aas/full/1998/11/ds1441/ds1441.html>].
- [78] Top Story - The Sun's Dark secret: How Sunspots Pull Themselves Together.  
[<http://www.gsfc.nasa.gov/topstory/20010919sunspot.html>].
- [79] TRACE Flare Catalog.  
[[http://hea-www.harvard.edu/trace/flare\\_catalog/index.html](http://hea-www.harvard.edu/trace/flare_catalog/index.html)].
- [80] trace home page.  
[<http://sunland.gsfc.nasa.gov/smex/trace/>].
- [81] TRACE satellite beams back best-ever image of solar surface.  
[<http://www.exn.ca/Templates/Story.cfm?ID=1998042952>].
- [82] Ulysses - ESA.  
[<http://helio.estec.esa.nl/Ulysses/>].

- [83] Volkssterrenwacht Urania: Sterrenkunde: Zonnestelsel: De zon.  
[<http://www.urania.be/sterrenkunde/zonnestelsel/zon.php>].
- [84] Wikipedia.  
[<http://www.wikipedia.org/>].
- [85] X-ray Solar Flare Classification.  
[<http://www.spaceweather.com/glossary/flareclasses.html>].
- [86] Yohkoh Mission.  
[<http://science.nasa.gov/ssl/pad/solar/yohkoh.htm>].
- [87] YPOP Home Page.  
[<http://solar.physics.montana.edu/YPOP/>].