



Universiteit
Leiden
The Netherlands

From electrons to stars : modelling and mitigation of radiation damage effects on astronomical CCDs

Prod'homme, T.

Citation

Prod'homme, T. (2011, November 22). *From electrons to stars : modelling and mitigation of radiation damage effects on astronomical CCDs*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/18136>

Version: Corrected Publisher's Version

License: [Licence agreement concerning inclusion of doctoral thesis in the Institutional Repository of the University of Leiden](#)

Downloaded from: <https://hdl.handle.net/1887/18136>

Note: To cite this publication please use the final published version (if applicable).

Nederlandse samenvatting

Met het vervangen van schepen door ruimtesondes en ogen door de moderne digitale tegenhanger — de CCD detector — volgen de wetenschappers van nu, die ruimtemissies bedenken, bouwen en gebruiken, in de voetsporen van de ontdekkingsreizigers uit de Renaissance. Net als hen onthullen zij de contouren van nieuwe continenten en stellen ze vragen over de ons bekende wereld. De ruimte biedt de mogelijkheid om de hele hemel waar te nemen bij alle golflengten van het licht zonder daarbij last te hebben van de versturende effecten van de aardatmosfeer. De gewichtloosheid biedt wetenschappers ook betere controle en grotere stabiliteit van hun instrumenten. Het is dan ook niet verrassend dat veel van de recente vorderingen in onze kennis van het heelal te danken zijn aan het gebruik van ruimtetelescopen zoals de beroemde Hubble Space Telescope. Echter, de ruimte brengt niet alleen maar voordelen met zich mee. Het vacuüm, de hoge temperatuurgradiënten, en vooral de elementaire deeltjesstraling, maken de ruimte tot de meest onherbergzame omgeving die de mensheid heeft veroverd. Instrumenten aan boord van satellieten zullen onder invloed van straling van energetische deeltjes, zoals protonen afkomstig van de zon, langzamerhand slechter gaan functioneren of kunnen tijdelijk zelfs geheel uitgeschakeld worden. Het toepassen van maatregelen zoals extra bescherming tegen straling of het gebruik maken van materialen die goed tegen straling bestand zijn is vaak niet genoeg om heel nauwkeurige metingen te doen vanuit de ruimte. Het is dan ook noodzakelijk om bij het verwerken op aarde van de verzamelde gegevens rekening te houden met de effecten van de stralingsschade op de metingen. Detectoren van het type CCD zijn nu dusdanig efficiënt in de detectie van licht en de corresponderende beeldvorming dat ze het hart vormen van vele instrumenten aan boord van satellieten. Deze detectoren zijn vergelijkbaar met de detectoren die gebruikt worden in geavanceerde digitale camera's. Ze maken het mogelijk om de hemel waar te nemen, alsook de aarde en de vele lichamen in ons zonnestelsel, bij Röntgen tot infrarode golflengtes en vooral ook bij optische golflengtes. Het onderzoek beschreven in dit proefschrift is onderdeel van een wetenschappelijk programma om de effecten van stralingsschade op CCDs voor sterrenkundige toepassingen te begrijpen en de negatieve gevolgen ervan te verminderen. Mijn onderzoek vond plaats in de context van de Gaia astrometrische missie van het Europees Ruimtevaart Agentschap (ESA). Stralingsschade werd van het begin van de Gaia missie gezien als een van de belangrijkste bedreigingen voor het realiseren van de gewenste wetenschappelijke prestaties. In deze samenvatting zal ik eerst de Gaia ruimtemissie beschrijven en hoe daarmee het belangrijkste doel bereikt zal worden; het in drie dimensies nauwkeurig in kaart brengen van de plaats van de sterren in ons sterrenstelsel, de Melkweg. Ik zal dan kort uitleggen wat een CCD is en wat de effecten zijn van stralingsschade op het functioneren daarvan. Als laatste vat ik de inhoud van dit proefschrift en resultaten van mijn onderzoek samen.

De Melkweg in kaart brengen met Gaia

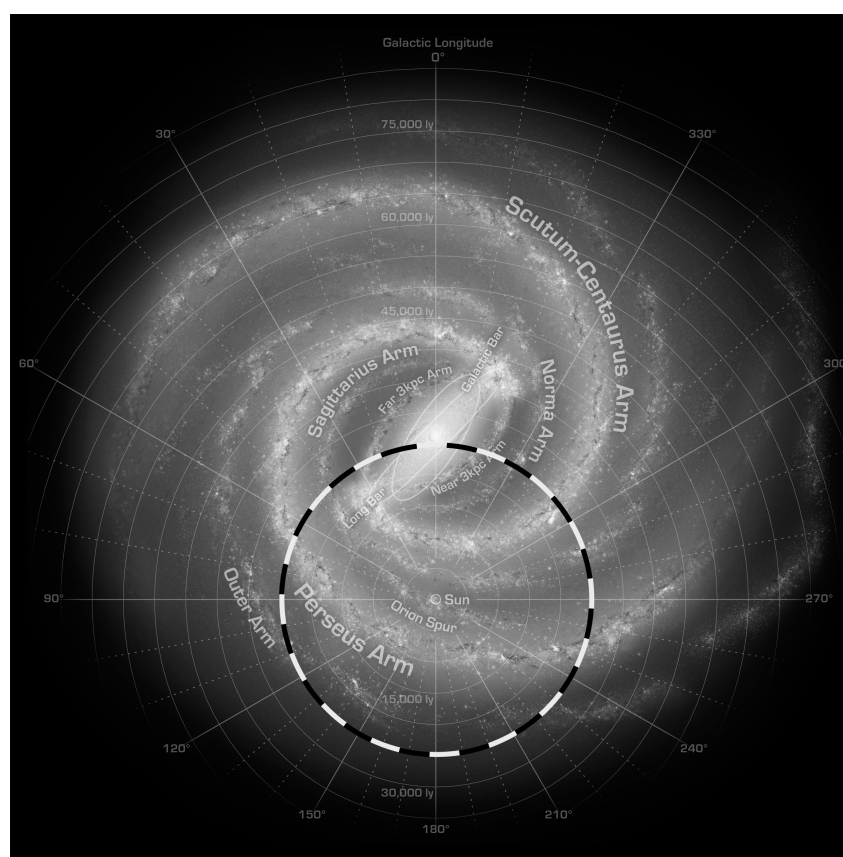
Waarom Gaia?

Gaia is een ruimtemissie met als doel het maken van de tot nu toe meest uitgebreide en nauwkeurige kaart van de Melkweg (zie figuur 7.1) door voor één miljard sterren de afstand tot de zon te bepalen, hun plaats aan de hemel, en hun beweging door de ruimte. We kunnen er alleen maar van dromen om ooit de gebieden in de Melkweg te bereiken die door Gaia in kaart gebracht zullen worden. Het doel van de Gaia missie is dan ook niet toekomstig ruimtetoerisme maar het doen van (wetenschappelijke) ontdekkingen. De precieze verdeling van sterren in de Melkweg is grotendeels nog onbekend en de exacte structuur en de bouwstenen van ons sterrenstelsel moeten nog ontdekt worden. We weten bijvoorbeeld dat ons sterrenstelsel, zoals vele andere, spiraalvormig is maar we weten niet precies hoeveel spiraalarmen er zijn. Een stereoscopische en dynamische kaart van de Melkweg stelt astronomen niet alleen in staat om exact de huidige structuur ervan te beschrijven maar ook om de vorming en evolutie van ons sterrenstelsel te verklaren. Bovendien zal Gaia ons in staat stellen om onze kennis van de vele soorten sterren aan te scherpen, om duizenden nieuwe buitenaardse planeten te vinden, de verdeling van asteroïden in het zonnestelsel in kaart te brengen, alsook om asteroïden te identificeren die op de aarde in kunnen slaan. Ten slotte kan Gaia ook de algemene relativiteitstheorie van Einstein verder op de proef te stellen.

De afstand van een ster tot de zon bepalen

Bij de zoektocht naar een beter begrip van ons heelal is het essentieel om de afstand te kennen die ons scheidt van de bronnen die we aan de hemel waarnemen. Het is bijvoorbeeld alleen door het meten van de afstand dat we kunnen bepalen hoe helder een ster intrinsiek is. Dit is het gevolg van het feit dat heldere sterren op grote afstand lichtzwakker lijken dan ze in werkelijkheid zijn. Echter, het meten van afstanden tussen ons (de zon) en onbereikbare objecten is een complexe aangelegenheid. De meest betrouwbare techniek die we hiervoor hebben is die van de trigonometrische parallax. Het is de meest betrouwbare techniek omdat er alleen van geometrie gebruik wordt gemaakt en er dus (bijna) geen aannames nodig zijn over ons begrip van het heelal. De parallax is de ogenschijnlijke beweging, veroorzaakt door een verandering van gezichtspunt, van een object op de voorgrond ten opzichte van objecten die verder weg in de achtergrond staan. U kunt makkelijk zelf het parallax effect waarnemen: (a) plaats een vinger vlak voor uw neus, (b) sluit één oog, (c) registreer de positie van de vinger ten opzichte van objecten in de achtergrond, (d) sluit het geopende oog en open het andere oog (verander dus van gezichtspunt), (e) zie hoe uw vinger zich lijkt te verplaatsen ten opzichte van objecten in de achtergrond. Door stappen (b) tot en met (e) kort na elkaar te herhalen kunt u de vinger zien bewegen ook al staat hij in werkelijkheid stil; het parallax effect. Door uw vinger nu verder weg te houden kunt u zien hoe de beweging van uw vinger ten opzichte van de achtergrond kleiner lijkt te worden. Hoe verder het waargenomen object hoe kleiner de parallax. Dit laatste illustreert waarom het lastig is om de afstand tot ver weg staande sterren te bepalen, hun verplaatsingen aan de hemel worden dan erg klein en dus moeilijk te meten. Een manier om de ogenschijnlijke verplaatsingen te vergroten is door de afstand tussen de

twee gezichtspunten, oftewel de basislijn, te vergroten. Sterren staan zó ver weg dat astronomen gebruik moeten maken van de omloop van de aarde rond de zon om zo hun (jaarlijkse) parallax te kunnen meten. De eerste meting in de 19^e eeuw van de (allang voorspelde) parallax gebeurde ook daadwerkelijk door gedurende een jaar de posities van sterren aan de hemel te bepalen om zo gebruik te maken van de diameter van de aardbaan als basislijn. Figuur 7.2 laat het principe van deze meting zien. De eerste succesvolle parallax meting is gedaan door Friedrich Bessel in 1838 voor een van de helderste en dichtstbijzijnde sterren, 61 Cygni. De parallax wordt gewoonlijk als de hoek ϖ gegeven (zie figuur 7.2). Voor 61 Cygni is deze hoek $\varpi = 287$ milli-boogseconde (mas), ofwel minder dan $1/10000$ graad. Deze hoek is vergelijkbaar met de hoekmaat van de voetstap van Niel Armstrong op de maan gezien vanaf de aarde (ongeveer 150 mas). De parallax van 61 Cygni komt overeen met een afstand tot deze ster van 11.4 lichtjaar (1.07×10^{17} km!).



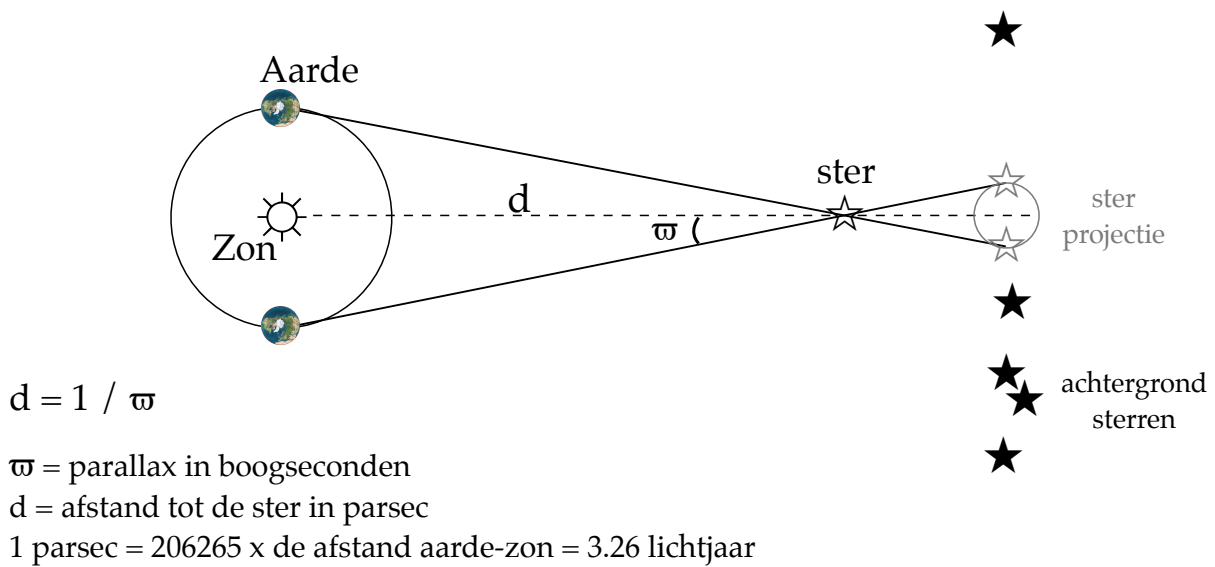
Figuur 7.1 — Schematische weergave van de verdeling van sterren in ons sterrenstelsel, Melkweg, zoals ‘van boven af’ gezien. De zon en de aarde bevinden zich in de buitendelen van ons sterrenstelsel vlak bij een van de spiraalarmen (midden onder in de illustratie). De gestreepte cirkel geeft het bereik aan tot waar de afstandsmetingen van Gaia nauwkeuriger dan 10% zullen zijn. De grens van dit bereik ligt op 30 000 lichtjaar van de zon (ofwel op 2 miljard keer de afstand aarde-zon). Buiten deze cirkel kunnen de afstanden van sterren met minder nauwkeurigheid bepaald worden zelfs tot aan de Andromeda Nevel, het dichtstbijzijnde grote spiraalstelsel. In totaal zullen één miljard sterren door Gaia waargenomen worden, één procent van het totaal aantal sterren in de Melkweg. De illustratie, die onze huidige kennis weergeeft, is gemaakt door R. Hurt (NASA/JPL-Caltech).

De noodzaak om de ruimte in te gaan

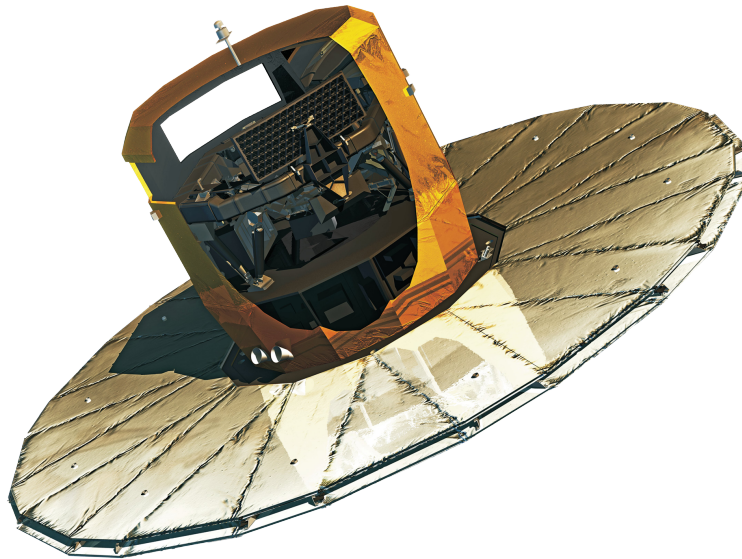
Het meten van de parallax van een ster (ofwel de afstand van de ster tot de zon) vereist: (i) een grote stabiliteit van het instrument en waarneemplatform in de tijd, omdat de metingen van een sterpositie aan de hemel herhaald moeten worden op verschillende tijdstippen om dan met elkaar verbonden te worden; (ii) precieze bepalingen van de plaats van een sterbeeld ten opzichte van het meetinstrument en de kijkrichting ervan, om zo op ieder moment nauwkeurig de plaats van de ster aan de hemel te meten; (iii) het zeer efficiënt op kunnen vangen van licht om op die manier een nauwkeurige plaatsbepaling van sterbeelden te kunnen doen en om zwakke sterren op grote afstand te kunnen waarnemen. Het waarnemen van de hemel met een ruimtesonde is de sleutel tot het voldoen aan deze drie voorwaarden. Bovendien maakt Gaia gebruik van twee telescopen, waarvan de kijkrichtingen een grote onderlinge hoek maken, het mogelijk om de parallaxen van de vele sterren aan de hemel van elkaar te onderscheiden om zo absolute parallaxen te bepalen die geen systematische fouten bevatten. Deze zogenaamde 'groothoek' techniek is alleen vanuit de ruimte mogelijk (zei hoofdstuk 1 voor meer details). Het aantal en de nauwkeurigheid van parallax metingen is gestaag toegenomen sinds de 19^e eeuw door het verbeteren van de meetmethoden, maar vooral door de technologische vooruitgang die gemaakt is met het detecteren en opvangen van licht. In 1989 werden de parallax metingen tot een voorlopig hoogtepunt gebracht met de lancering van de eerste satelliet bestemd voor dit soort metingen en uitgerust met fotoversterkerbuizen; de Hipparcos missie van ESA.

De Gaia missie

Gaia zal de tweede Europese ruimtemissie zijn die volledig gewijd is aan astrometrie, de kunde van het meten van posities van sterren, hun ruimtelijke bewegingen en hun parallaxen. Gaia is ontworpen met als doel het voorbijstreven van de prestaties van Hipparcos met een aantal ordes van grootte in parallax nauwkeurigheid (van millinaar micro-boogseconden) en aantal waargenomen objecten (van 100 000 tot 1 miljard). Het Gaia project is nu in de eindstadia van de voorbereidingen, zowel wat betreft het fabriceren van de satelliet als het voorbereiden van de gegevensverwerking, de twee grote uitdagingen van de missie. Gaia wordt in 2013 gelanceerd met een Soyuz raket vanaf de lanceerbasis vlakbij Kourou in Frans Guyana. De bestemming van de satelliet is niet een baan om de aarde maar een punt in ons zonnestelsel genaamd L2: het tweede Lagrange punt van het aarde-zon systeem. L2 ligt op een afstand van ongeveer 1.5 miljoen kilometer van de aarde op de zon-aarde as in de richting tegengesteld aan die van de zon (richting Mars zogezegd). Deze afstand is vier keer die van de aarde naar de maan. Gaia zal net als de aarde jaarlijks een baan om de zon maken gedurende de vijf jaar die de missie duurt. Gedurende deze tijd zal Gaia continu de hemel aftasten en de sterren waarnemen. Figuur 7.3 laat de Gaia satelliet zien. Alle apparatuur die nodig is voor het functioneren van de satelliet (de service module) en de wetenschappelijk metingen (de nuttige lading) bevindt zich onder de cilindervormige structuur, de thermische tent. De thermische tent bevindt zich op een zonnenscherm van 10 meter doorsnede die de nuttige lading beschermt tegen direct zonlicht om zo de temperatuur stabiel te houden. De nuttige lading van Gaia bestaat uit twee telescopen en drie wetenschappelijke instrumenten die het licht naar één brandvlak leiden. Het brandvlak



Figuur 7.2 — Vereenvoudigde weergave van het principe van de afstandsbe­paling voor een ster met behulp van de parallax. Deze techniek vereist het herhaaldelijk waarnemen van de positie van een ster aan de hemel gedurende een jaar. Zodoende kunnen we gebruik maken van de grootste mogelijke basislijn, de diameter van de baan van de aarde om de zon. De parallactische beweging van de ster wordt aangegeven met de kleine grijze cirkel (rechts). Het is de ogenschijnlijke beweging van de ster op de voorgrond ten opzichte van de achtergrondsterren. De parallactische beweging is periodiek en is een afspiegeling aan de hemel van de draaiing van de aarde om de zon.



Figuur 7.3 — Het Gaia ruimtevaartuig met het ontvouwen zonnescerm. De uitsnede in de thermische tent geeft zicht op (van boven naar beneden) (i) de nuttige lading met de twee hoofdspiegels die gemonteerd zijn op de mechanisch en thermisch uiterst stabiele torus van silicium-carbide, en (ii) de zogenaamde service module die het functioneren van de satelliet mogelijk maakt. De satelliet is drie meter hoog en het zonnescerm heeft een diameter van 10 meter. Illustratie met dank aan EADS Astrium.

bestaat uit 106 hoogwaardige CCDs die specifiek voor Gaia vervaardigd zijn. Deze detectoren zullen continu digitale beelden van sterren produceren, die vervolgens naar de aarde geseind worden voor een gedetailleerde analyse. Door voor iedere ster (ieder beeld) de exacte positie te bepalen kan de beweging van een ster aan de hemel gedurende 5 jaar bepaald worden. Hieruit volgen dan de plaats van de ster aan de hemel, de parallax, en de beweging van de ster door de ruimte.

De uitdaging van de gegevensverwerking voor Gaia

Het brandvlak van Gaia bevat meer dan 1 miljard beeldelementen; ook al wordt slechts een klein venster rond ieder sterbeeld doorgeseind zal de hoeveelheid data ontvangen op aarde aanzienlijk zijn. Bovendien worden de beelden op verschillende tijdstippen gemaakt voor verschillende soorten objecten (niet alleen sterren, maar ook sterrenstelsels, asteroïden, etc.) en met drie verschillende instrumenten. Vanwege de complexiteit en de omvang van de gegevensstroom zal de verwerking ervan een van de meest uitdagende onderdelen van de Gaia missie zijn. Daarom zijn meer dan 400 wetenschappers (astronomen, ingenieurs, ontwikkelaars van programmatuur) verdeeld over 24 landen al een aantal jaar bezig met het ontwikkelen van de algoritmes en programmatuur voor de verwerking van de toekomstige gegevensstroom van Gaia.

De uitzonderlijke prestaties en de verwachte oogst aan ontdekkingen met Gaia zijn grotendeels te danken aan het ruime gebruik van extreem efficiënte detectoren van licht, de CCDs. In het volgende deel wordt uitgelegd wat CCDs zijn en wat het effect van straling van energetische deeltjes op hun functioneren is.

CCDs en de bedreiging van stralingsschade

Wat is een CCD?

Een CCD is een lichtsensor: een elektronisch apparaat dat licht kan detecteren en de corresponderende beelden kan digitaliseren. De CCD, ofwel 'Charge Coupled Device', werd in 1969 uitgevonden bij Bell Telephone Laboratories door Willard S. Boyle en George E. Smith. De mogelijkheid om kwantificeerbare en nauwkeurige metingen te doen van lichtdeeltjes (fotonen) bij een verscheidenheid aan golflengten bracht een revolutie teweeg in de sterrenkunde, maar ook in het dagelijks leven door het mogelijk maken van digitale fotografie. Als erkenning voor deze prestatie werd in 2009 de Nobelprijs in de natuurkunde toegekend aan Boyle en Smith.

Een CCD bestaat uit een matrix van discrete beeldelementen, pixels genaamd. De pixels bestaan uit drie lagen van verschillende materialen: (i) een geleidende laag (bijvoorbeeld een metaal), (ii) een isolerende laag, en (iii) een halfgeleider laag (meestal silicium). Het is in de halfgeleider laag dat de fotonen waar het licht uit bestaat omgezet worden in electronen. Door de voltages van het geleidende materiaal te manipuleren kunnen de electronen van een pixel in de detector naar de volgende verplaatst worden. Uiteindelijk worden de electronen naar een elektronisch onderdeel verplaatst (het uitleesregister) dat in staat is om ladingspakketen in voltages om te zetten die vervolgens gedigitaliseerd worden. Op die manier wordt een digitaal beeld opgebouwd. De werking van een CCD berust dus op het vermogen om: (i) electronen te genereren uit het opvallende licht, (ii) die electronen te verplaatsen van het punt waar ze ge-

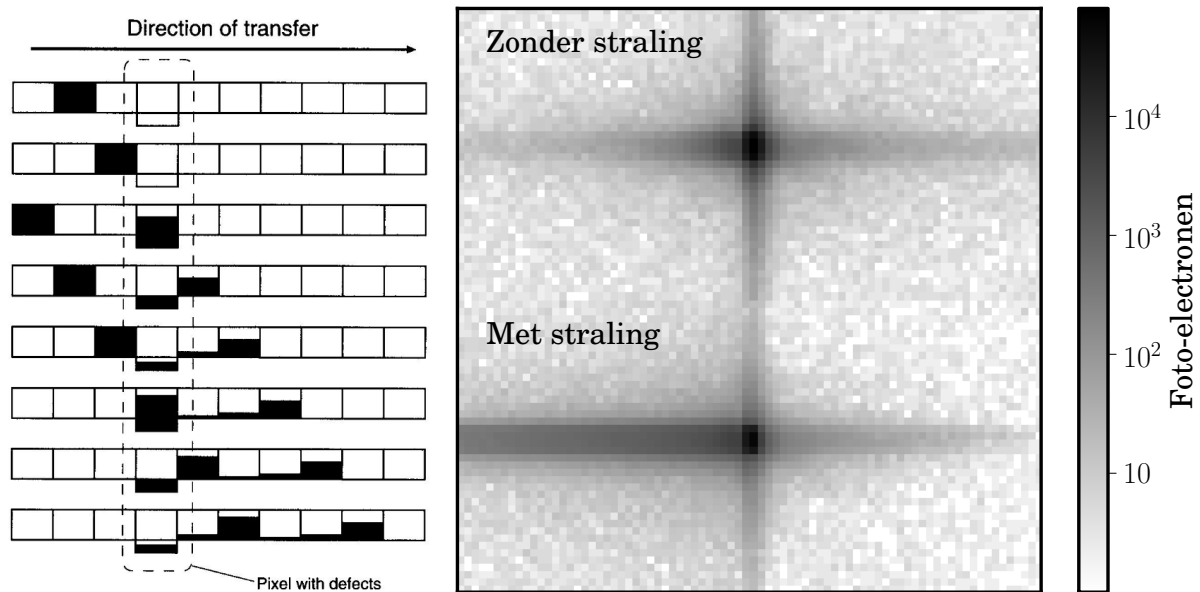
nereerd zijn tot aan het uitleesregister, en (iii) de lading bij het uitleesregister te meten met zo min mogelijk ruis. Stralingsschade leidt ertoe dat een CCD minder efficiënt de gegenereerde electronen kan verplaatsen.

Wat is stralingsschade?

Met de term stralingsschade wordt het negatieve effect bedoeld van de straling van energetische deeltjes in de ruimte op de werking van elektronische apparatuur aan boord van satellieten. Alhoewel het nabootsen van het vacuüm in de ruimte met kunstmatige middelen vrijwel onmogelijk is op aarde, is de ruimte verre van leeg, vooral niet in de buurt van sterren zoals de zon. De ruimte tussen de planeten bestaat uit neutrale deeltjes, plasma's, kosmische stralingsdeeltjes, micrometeoroiden, ruimteschroot, en vooral straling. Met straling wordt meestal het hele elektromagnetische spectrum bedoeld alsook energetische subatomaire deeltjes zoals electronen, protonen en neutronen. Fotonen kunnen ook schadelijk zijn maar het zijn vooral de subatomaire deeltjes die de stralingsschade veroorzaken. Deze deeltjes zijn afkomstig van de zon en vooral van de spectaculaire uitbarstingen aan het oppervlak. De constante stroom deeltje die het planetenstelsel doorkruist wordt de zonnwind genoemd. De omslag van dit proefschrift laat een kunstzinnige impressie zien van de zonnwind en zijn ontstaan in uitbarstingen die aan de buitenkant van onze ster plaatsvinden (de rode schijf onderaan). Het magnetische veld van de aarde (blauwe schijf in het midden) beschermt ons tegen de deeltjes in de zonnwind, maar Gaia (gele symbool bovenaan) is ver van deze beschermende omgeving verwijderd en bevindt zich bij L2 middenin deze vernietigende wind. Als de energetische deeltjes, vooral protonen, botsen op de CCDs van Gaia veroorzaken zij defecten in het halfgeleider materiaal door het verplaatsen van atomen uit hun normale positie in het kristalrooster. Deze defecten kunnen electronen invangen tijdens hun verplaatsing van de ene pixel naar de andere. Het invangen van electronen is aan het toeval onderworpen en is slechts tijdelijk. Het vrijlaten van het electron, ook een toevalsproces, kan gebeuren tijdens de verplaatsing van het beeld over het defect of als het beeld al voorbij gekomen is. In het laatste geval zal een deel van het signaal verloren gaan en zal de signaal-ruis verhouding afnemen. In beide gevallen zal de herverdeling van de electronen door de defecten leiden tot een vervorming van het digitale beeld. Deze vervorming is geïllustreerd in figuur 7.4. De defecten zullen zich in de loop van de missie opeenstapelen in iedere CCD en de gevolgen van stralingsschade zullen dan ook het grootst zijn tegen het einde van missie.

De effecten van stralingsschade op de Gaia metingen

De beelden die Gaia naar de aarde stuurt zullen door astronomen gebruikt worden om de positie van sterren aan de hemel te bepalen. Hiertoe moet met zeer grote precisie de exacte plaats van het digitale beeld op de CCD bepaald worden; tot op minder dan een duizendste pixel voor heldere sterren. De sterposities aan de hemel op verschillende tijdstippen worden dan gebruikt om de echte en schijnbare (parallax) verplaatsing van een ster aan de hemel te bepalen, om daar uiteindelijk de afstand uit af te leiden. De effecten van stralingsschade aan de metingen zijn tweeledig: (i) stralingsschade leidt tot een vermindering van de signaal-ruis verhouding. Dit is in feite een verlies aan informatie. Voor heldere sterren maakt het verlies van enkele electronen niet veel uit.



Figuur 7.4 — **Links:** Stralingsschade vermindert het vermogen van een CCD detector om electronen te verplaatsen van een pixel naar de andere als gevolg van het ontstaan van defecten in de kristalrooster van het silicium waar de CCD uit bestaat. Iedere rij in de illustratie komt overeen met een pixelkolom in een verschillend stadium van het proces van ladingsoverdracht. Van boven naar beneden gezien wordt een ladingspakket verplaatst van de tweede naar de negende pixel. Het vierde pixel bevat een defect waar electronen door ingevangen kunnen worden en die vervolgens bij iedere volgende ladingsoverdracht geleidelijk weer vrijgegeven worden. Dit leidt tot het karakteristieke ladingsspoor dat men ziet in beelden die gemaakt zijn met door straling beschadigde CCDs. Illustratie met dank aan J. Walder (Universiteit van Lancaster). **Rechts:** Gesimuleerde beelden van een ster waargenomen met Gaia, vóór en na het optreden van stralingsschade. De positie van de ster aan de hemel wordt foutief bepaald als met dit effect geen rekening wordt gehouden. De vervorming van het sterbeeld is gesimuleerd met behulp van het fysische Monte Carlo model beschreven in hoofdstuk 2.

Daarentegen vertegenwoordigen de verloren electronen een flink deel van het signaal van zwakke sterren. Het gevolg is dat als de stralingsschade niet tegengegaan wordt, Gaia bijna blind zal zijn voor de verst verwijderde sterren in ons sterrenstelsel.

(ii) We hebben ook gezien dat het sterbeeld vervormd wordt door de effecten van stralingsschade. Als gevolg is de informatie over de plaats van de ster op de CCD verschillend en ingewikkelder. Wordt dit niet meegenomen in de analyse van het sterbeeld, ontstaat er een systematische fout bij het bepalen van de plaats van het sterbeeld op de CCD. Deze fout kan oplopen tot een tiende pixel, dus honderd keer groter dan acceptabel is. Het is dus in de eerste plaats van belang om het invangen van electronen te voorkomen door fysieke maatregelen te treffen in de apparatuur en in de tweede plaats om rekening te houden met de vervorming van het sterbeeld tijdens de analyse ervan (tegenmaatregelen in de programmatuur voor de gegevensverwerking).

Dit proefschrift

Mijn onderzoek

Stralingsschade werd al vroeg herkend als mogelijk een belangrijke bedreiging voor de wetenschappelijke resultaten van Gaia. De industriële partners in het project kregen dus de opdracht om een aantal experimentele campagnes, bestaande uit proeven met bestraalde Gaia CCDs, uit te voeren met als doel: het effect van stralingsschade op de Gaia metingen te kenmerken, het identificeren en optimaliseren van fysieke tegenmaatregelen in de apparatuur, en het ondersteunen van de inspanningen van de astronomen om stralingsschade te modelleren en om een strategie te ontwikkelen om de effecten ervan in de gegevensverwerking zoveel mogelijk te verminderen.

In deze context was mijn onderzoek voornamelijk gericht op het modelleren van de effecten van stralingsschade aan CCDs, ondersteund door de resultaten van de analyse van de experimentele gegevens. Ik heb het tot nu toe meest gedetailleerde model ontwikkeld van stralingsschade in CCDs waarmee de werking van bestraalde CCDs nagebootst kan worden (**hoofdstuk 2**). Gebruik makende van dit model kon ik ons huidige begrip van de effecten van stralingsschade bevestigen en ook verbeteren, en kon ik ook het kenmerken van de beproefde CCDs ondersteunen en daarmee een beter begrip van de experimentele resultaten realiseren (**hoofdstukken 3 en 6**). Als onderdeel van dit onderzoek heb ik ook een gedetailleerde herbeoordeling gemaakt van de te verwachten nauwkeurigheid van de metingen van Gaia door de effecten van stralingsschade mee te rekenen (**hoofdstukken 3 en 4**). Ten slotte heb ik deelgenomen aan de inspanningen om de effecten van stralingsschade tegen te gaan door het uitwerken, het toetsen en het verbeteren van een nieuwe aanpak van de analyse van sterbeelden (**hoofdstukken 3 en 5**), alsmede aan het toetsen en verkennen van de mogelijkheden van een specifieke fysieke tegenmaatregel in de apparatuur (**hoofdstuk 6**).

Hoofdconclusies

Het belangrijkste resultaat in dit proefschrift is dat de stralingsschade aan CCDs niet langer een bedreiging vormt voor de Gaia missie omdat ik heb laten zien dat het mogelijk is om de negatieve effecten tegen te gaan door het treffen van een aantal fysieke maatregelen en door het ijken van de overgebleven effecten met behulp van specifieke algoritmes. Het is echter belangrijk om te bedenken dat dit proefschrift geen punt zet achter het stralingsschade probleem voor Gaia. De beschreven algoritmes moeten nog in de gegevensverwerking van Gaia opgenomen worden. We zullen slechts in 2013 bij het ontvangen van eerste ruwe gegevens van Gaia weten of de voorspellingen in dit proefschrift correct zijn. Ik beschrijf nu hoe de resultaten van ieder hoofdstuk in dit proefschrift bijdragen aan het tot stand komen van de hoofdconclusies.

Hoofdstuk 2 beschrijft het tot nu toe meest gedetailleerde model van stralingsschade aan CCDs. Dit model geeft uitvoering aan een nieuwe benadering van het beschrijven van de ladingsverdeling binnen een CCD pixel en het berekenen van de waarschijnlijkheden van het invangen en weer vrijgeven van electronen door defecten. Deze nieuwe aanpak maakt het nabootsen mogelijk van de effecten van stralingsschade voor verschillende soorten metingen (astrometrisch en spectroscopisch) over een groot signaalbereik en in het bijzonder voor signalen van de orde van slecht een paar electronen

(fotonen). De belangrijkste les uit dit onderzoek is dat geen enkel detail verwaarloosd mag worden om te komen tot een succesvolle nabootsing van de effecten van stralingsschade bij zeer zwakke signalen. De simulaties moeten zo realistisch mogelijk zijn, zelfs tot op het niveau van het verplaatsen van electronen van een elektrode naar de andere en op het niveau van de simulatie van ieder individueel defect.

In **hoofdstukken 3 en 4** beschrijf ik twee studies die gericht zijn op het kenmerken en kwantificeren van het effect van de stralingsschade aan de CCDs op de uiteindelijke astrometrische meetnauwkeurigheid van Gaia. De eerste studie is gericht op de analyse van de sterbeelden en de tweede studie op het voortplanten van de fouten, gemaakt bij de beeldanalyse, in de keten van algoritmen die uiteindelijk leiden tot de kaart van de Melkweg. In **hoofdstuk 3** laat ik zien dat het verlies aan signaal-ruis verhouding leidt tot een onherroepelijk verlies van de theoretisch haalbare nauwkeurigheid bij het meten van de positie van het sterbeeld, en dat dit verlies kan oplopen tot 6% aan het einde van de missie. Dit onomkeerbare verlies kan alleen tegengegaan worden door fysieke maatregelen in de apparatuur. Ik laat echter ook zien dat dit soort maatregelen niet voldoende is en dat een nieuwe aanpak van de sterbeeldanalyse nodig is om systematische fouten in het meten van de plaats van het beeld te voorkomen. Ik beschrijf de nieuwe aanpak en toets de prestaties ervan. Ik laat daarbij zien dat de systematische fouten als gevolg van de vervorming van het sterbeeld met een factor tien teruggebracht kunnen worden. In **hoofdstuk 4** worden de effecten van de overgebleven fouten op de uiteindelijke kaart van de Melkweg bestudeerd. Daarbij worden de onderliggende mechanismen gekenmerkt die leiden tot een opeenstapeling van fouten volgens bepaalde patronen aan de hemel. Ik laat zien dat dit het gevolg is van de manier waarop Gaia de hemel aftast en dat deze foutenpatronen ook in de bijproducten van de astrometrische algoritmes te herkennen zijn, zodanig dat een correctie toegepast kan worden. Uiteindelijk laat ik zien dat de gewenste astrometrische nauwkeurigheid van Gaia gewaarborgd is door de combinatie van maatregelen in de apparatuur, de nieuwe aanpak van de beeldanalyse, en het gebruik maken van de bijproducten van de astrometrische algoritmes.

Hoofdstuk 5 is gericht op een demonstratie van de prestaties van de nieuwe aanpak om vervormde beelden te analyseren. Dit wordt gedaan met behulp van beelden verkregen in experimenten met bestraalde CCDs. Ik laat zien dat het inderdaad mogelijk is om systematische fouten in de plaatsbepaling van de sterbeelden met een factor tien terug te brengen zoals voorspeld in hoofdstuk 3. Echter de ijking van de nieuwe methode zou wel eens moeilijk kunnen zijn als er geen oplossing wordt gevonden voor het probleem dat we nu niet met dezelfde model parameters de effecten bij verschillende signaalniveaus kunnen beschrijven. Ten slotte geef ik een aantal suggesties om de ijking van deze nieuwe methode te vergemakkelijken.

In **hoofdstuk 6** onderzoek ik een specifiek kenmerk van de Gaia CCD pixels dat erop gericht is om de effecten van stralingsschade te verminderen, het zogenaamde aanvullende verzonken kanaal. Ik laat zien dat dit kanaal inderdaad de stralingseffecten vermindert. Helaas is door fabricagefouten het aanvullende kanaal bij sommige Gaia CCDs niet aanwezig. Ik laat echter zien dat dit alleen het geval is in één helft van de betreffende CCDs, en dat de astrometrische nauwkeurigheid van Gaia binnen de gestelde eisen blijft zolang met dit probleem rekening wordt gehouden in de beeldanalyse.