



Universiteit  
Leiden  
The Netherlands

## Dancing with the stars

Albert, J.G.

### Citation

Albert, J. G. (2020, October 28). *Dancing with the stars*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/137988>

Version: 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/1887/137988>

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

Cover Page



Universiteit Leiden



The handle <http://hdl.handle.net/1887/137988> holds various files of this Leiden University dissertation.

**Author:** Albert, J.G.

**Title:** Dancing with the stars

**Issue Date:** 2020-10-28

# Nederlandse Samenvatting

*Vertaald door Martijn Oei*

Wat we weten is een druppel, en wat we niet weten, een oceaan. Sommige mensen zeggen dat de enige dingen die we kunnen weten, dingen zijn die je met het blote oog kunt zien. Licht opnemen, en kennis produceren. Dat is de manier waarop informatie, in eerste instantie primitief en zonder interpretatie, uiteindelijk terecht komt op plekken als Wikipedia, in boeken, op scholen, en in de hoofden van de volgende generatie. Ga de volgende keer dat er 's nachts in jouw stad een stroomstoring is eens naar buiten, en kijk dan omhoog. Met een beetje geluk is het niet bewolkt, en zie je de kosmos naar beneden staren. Het zal je dan opvallen dat de meeste lichtjes die je ziet, twinkelen, als verafgelegen kaarsen in de wind. Van een paar zal het je opvallen dat ze niet twinkelen, en – zoals je misschien al zult weten – dat zijn de planeten van ons zonnestelsel. Mars, Venus, Jupiter... Deze mythische figuren doen denken aan verhalen over de oorlogen, liefde, en wraak van goden, en het duurt niet lang voordat je gedachten met je aan de wandel gaan. Wanneer was het voor het laatst dat je 's nachts naar de hemel hebt gekeken?

Als je licht van het radiospectrum zou kunnen zien, dus als je ogen gevoelig waren voor golflengten groter dan een centimeter, dan zou je een hemel zien die er volkomen anders uitziet dan het met-sterren-bezaaide tafereel waaraan je gewend bent vanuit het zichtbare spectrum. De radiohemel bevat grote diffuse structuren, compacte pulserende bronnen, filamentaire structuren, ringachtige structuren, en meer. Deze vormen corresponderen met een scala aan fysische processen die zich in het Universum voltrekken.

Eén zo'n fysisch proces dat we in dit proefschrift bespreken, is synchrotronemissie afkomstig van het samensmelten van clusters van sterrenstelsels. Synchrotronemissie is licht met radiofrequentie dat ontstaat door snelbewegende elektrische ladingen in een omringend magnetisch veld. Clusters van sterrenstelsels, die honderd miljoen keer groter kunnen worden dan ons zonnestelsel, zijn de voornaamste zwaartekrachtspuiten in het Universum, met massa's van zo'n honderdduizend miljard zonsmassa's. Clusters van sterrenstelsels vormen de knopen van het kosmische web, die verbonden worden met uitgerekte filamenten en dunne vliezen. Omdat ze zo ontzettend groot zijn, vormen ze interessante laboratoria om natuurkundige wetten te toetsen.

Soms nemen clusters van sterrenstelsels materiaal op dat met relatieve snelheden van meer dan duizend kilometer per seconde vanuit de rest van het kosmische web komt aanstormen. Zulke botsingen en samensmeltingen kunnen worden gezien als het analogon van deeltjesversnellers hier op aarde, waarmee we fysische theorieën testen die over het allerkleinste gaan. Samensmeltingen van clusters onderling zorgen voor grote naar buiten bewegende

---

schokgolven in het intraclustermedium (ICM), waarbij gigantische hoeveelheden kinetische energie ( $10^{56}$  J) vrijkomen in de vorm van turbulentie en de versnelling van kosmische straling (in het bijzonder elektronen - CRe) naar ultrarelativistische snelheden. Deze CRe stralen synchrotronemissie uit waarmee de dynamica van de samensmeltingen af te leiden is, en waarmee, aan de hand van geavanceerde computationele technieken, natuurkundige theorieën over de grootste schalen getoetst kunnen worden.

In Hoofdstuk 1 onderzoeken we één bepaald cluster van sterrenstelsels (met de naam PLCK G004.5-19.5), dat de interessante eigenschap heeft dat we hem zien zoals hij kosmologisch ver terug in de tijd eruit zag (op een roodverschuiving van  $z = 0.52$ ). We onderzoeken het cluster op 150, 325 en 610 MHz met de Giant Metrewave Radio Telescope [GMRT; Gupta et al., 2017], en vinden emissie die erop wijst dat het cluster in het verleden een samensmelting met een ander ondergaan heeft, maar het patroon van de emissie is te ingewikkeld om er veel meer over te kunnen zeggen. Een interessante bevinding is dat het centrale gebied van het cluster een diffuse component lijkt te hebben die veel weg heeft van wat een radiohalo wordt genoemd. Men denkt dat radiohalos ontstaan door turbulentie, en dat hun bestaan op hoge roodverschuiving zeldzaam is. Die zeldzaamheid is het gevolg van het feit dat stralingsenergie verloren gaat door een proces dat inverse comptonverstrooiing wordt genoemd, en dat energieverlies schaalt als  $\propto (1+z)^4$ . Daarom is het eigenlijk niet zo dat radiohalos niet bestaan op hoge roodverschuiving, maar meer dat ze te lichtzwak zijn om waargenomen te worden. Het is zelfs zo dat deze observationele begrenzing in kosmologische roodverschuiving een waardevol instrument is om kosmologische modellen te toetsen. De aanwezigheid van lichtzwakke, complexe emissie in clusters van sterrenstelsels op hoge roodverschuiving, en de bijbehorende verborgen schat aan informatie, vraagt om de ontwikkeling van radiotelescopen met hoge resolutie, ontvangst bij lage frequenties, brede waarneembanden en hoge gevoeligheden.

De radiosterrenkunde is flink veranderd sinds de beginnagen. Vroege pioniers van radiointerferometrie [Ryle and Vonberg, 1946] verzamelden data, ‘visibilities’ genoemd, met analoog aangedreven pennen op papier. Ze konden de data aanraken met hun handen. Vandaag de dag ziet een radioastronoom echter zelden de visibilities. Radiotelescopen zijn enkele van de grootste data-experimenten van de mensheid. Eén zo’n telescoop, welke in een groot gedeelte van dit proefschrift centraal zal staan, is de Low-Frequency Array [LOFAR; van Haarlem et al., 2013].

Aangezien er een duidelijke behoefte is aan diepere en betere radiobeelden, is een groot deel van de radiosterrenkunde technisch van aard, en heeft te maken met calibratie en beeldvorming. Kort gezegd karakteriseren de visibilities hoe licht van twee verafgelegen, maar qua hoek nabijgelegen, bronnen aan de hemel met elkaar interfereren. Net zoals het interferentiepatroon in het tweespletenexperiment van Thomas Young hem vertelde hoe ver de spleten uit elkaar stonden, zo vertellen de visibilities ons hoe ver radiobronnen uit elkaar staan aan de hemel. Calibratie en beeldvorming is het proces waarbij computers gebruikt worden om grote hoeveelheden visibilities te inverteren.

Hoofdstukken 2 tot en met 4 behandelen het calibratieaspect. Calibratie is noodzakelijk omdat de telescoop en het medium tussen het instrument en de lichtbronnen voortdurend aan verandering onderhevig zijn. Zaken als temperatuur en luchtvochtigheid kunnen de manier waarop een radioantenne licht ontvangt, veranderen, en een atmosferische laag die bekend staat als de ionosfeer beïnvloedt hoe radiogolven naar de telescoop propageren. In dit proefschrift houden we ons bezig met calibratie van ionosferische effecten.

---

Eén van de uitdagingen van ionosferische calibratie is dat je de ionosfeer niet direct kunt zien. Er is een lange geschiedenis van mensen die dit uitdagende probleem hebben geprobeerd op te lossen. Er zijn, hoofdzakelijk, twee klassen van methoden voor ionosferische calibratie: veldgebaseerde calibratie [Cotton et al., 2004], waarin ogenschijnlijke bronverschuivingen in het beeld domein worden gemodelleerd, en facetgebaseerde calibratie [Intema et al., 2009, van Weeren et al., 2016, Tasse et al., 2018], waarin men ontkoppelde stukjes hemel calibreert die facetten genoemd worden. In dit proefschrift focussen we ons volledig op de facetgebaseerde aanpak.

Facetgebaseerde calibratie kent verschillende lagen aan complexiteit, maar we zullen hier vooral het basisidee schetsen. Het idee is dat wanneer licht met radiofrequentie door een medium reist met een lage dichtheid aan elektrische ladingen – zoals in de ionosfeer – de lichtgolf een kleine tijdsvertraging oploopt. Deze vertraging is evenredig met het aantal elektronen dat de golf tegenkomt, en je zou je daarom kunnen voorstellen dat je alle elektronen zou kunnen tellen tussen de radioantenne en de lichtbron, en de uitkomst zou kunnen gebruiken om het effect van de ionosfeer weg te calibreren. In zekere zin is dat wat facetgebaseerde calibratie klaarspeelt, maar dan voor iedere heldere bron in het blikveld.

Maar hoe werkt dat dan, aangezien we de ionosfeer niet kunnen zien? Het is inderdaad zo dat de uitdaging er volledig in ligt dat je een fysische grootheid moet afleiden puur en alleen op basis van het licht dat de antennes ontvangen. In dit proefschrift lenen we een concept van een geheel ander wetenschappelijk veld: seismische beeldvorming. Binnen de seismische beeldvorming is het doel om het inwendige van de aarde zichtbaar te maken door akoestische golven te laten weerkaatsen door structuren in de aarde, en de echos weer te meten aan het oppervlak. Deze methode is gebouwd rond het principe van tomografie.

Tomografie en kansrekening worden in Hoofdstuk 2 gebruikt om een methode af te leiden waarmee ionosferische effecten kunnen worden bepaald, en we laten aan de hand van simulaties zien dat deze methode superieur is aan een klasse andere methoden waarmee hetzelfde beoogd wordt. Deze superioriteit is het gevolg van het feit dat fysische wetmatigheden gebruikt zijn om de resultaten van de methode te vormen. In zijn algemeenheid is het erg krachtig om fysica te gebruiken om de verscheidenheid aan mogelijke uitkomsten van een proces in te perken tot alleen de plausibele.

Nadat duidelijk is dat deze krachtige nieuwe methode werkt op gesimuleerde data, passen we haar in Hoofdstuk 3 voor het eerst toe op echte data. In dit geval gebruiken we een achturige LOFAR-observatie, waarvan het beeld in eerste instantie grote calibratiefouten bevatte. Prettig genoeg constateren we dat onze methode in staat is om deze beeldfouten weg te werken, zodat we een stuk duidelijker beeld krijgen van dit kleine stukje hemel.

Logischerwijs willen we weten of dit succes een gelukje betrof, en of de methode robuust is. Daarom passen we in Hoofdstuk 4 dezelfde methode toe op twaalf achturige LOFAR-observaties, die allemaal gericht zijn op een deel van het sterrenbeeld Ursa Major (Grote Beer). Dit gebied staat bekend als het Lockmangat, omdat het erg weinig HI-emissie vertoont in de Galactische voorgrond. In dit geval blijkt er een algemene verbetering te zijn in tien van de twaalf gevallen, maar ook wordt duidelijk dat er een kleine systematische fout in de data zit waar we in eerste instantie niet van op de hoogte waren. Deze systematische fout blijkt erg moeilijk te kwantificeren.

Onze methode heeft groot initieel succes getoond en er zijn duidelijke vervolgstappen om haar te verbeteren en voornoemde systematische fout aan te pakken. Dit proces is typisch voor de wetenschap. Als methodes beter worden, neemt de onzekerheid in de resultaten af

---

en als gevolg wordt het bestaan van subtielere fenomenen blootgelegd. Vaak is dit de grens waar ontdekkingen worden gedaan en vooruitgang geboekt wordt.