



Universiteit
Leiden
The Netherlands

Reconstructing magnetic fields of spiral galaxies from radiopolarimetric observations

Shneider, C.

Citation

Shneider, C. (2015, December 17). *Reconstructing magnetic fields of spiral galaxies from radiopolarimetric observations*. PhD Thesis. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/37053>

Version: Not Applicable (or Unknown)
License: [Leiden University Non-exclusive license](#)
Downloaded from: <https://hdl.handle.net/1887/37053>

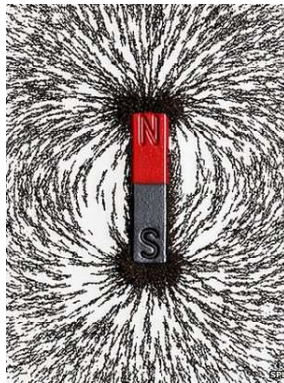
Note: To cite this publication please use the final published version (if applicable).

Nederlandse Samenvatting

– vertaald door Dr. Tjarda Boekholt, auteur van *Chaotic Dynamics in N-body Systems*.

Kosmisch Magnetisme in het kort

Toen je jong was heb je misschien weleens gespeeld met koelkastmagneetjes of was je geïntregerd door een kompas. Je hebt vast weleens geëxperimenteerd met staafmagneten en ijzervijzel, zodat Fig. 6.1 je bekend voor zou moeten komen.



Figuur 6.1: Een staafmagneet met ijzervijzel maakt de dipoolveldlijnen zichtbaar.

Bron: <http://www.bbc.com/news/science-environment-25946734>.

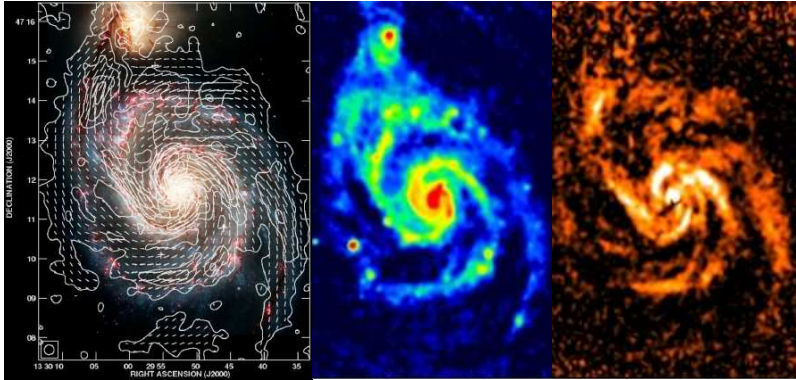
Deze figuur illustreert het dipool magnetisch veld. Deze veldconfiguratie functioneert als een simpele beschrijving van het magnetisch veld van de Aarde. Als we dit als een kompasnaald zouden beschouwen, dan zouden de 'N' en 'S' symbolen in Fig. 6.1 de richtingen van de magnetische noordpool en zuidpool aanwijzen. Echter, de 'N' en 'S' symbolen op het kompas corresponderen eigenlijk met respectievelijk de zuid- en noordpool van het kompasnaald zelf, omdat de tegenovergestelde polen elkaar aantrekken. Een dipoolveld is ook een veel voorkomende configuratie voor planeten (in het zonnestelsel) met een magnetisch veld. De aanwezigheid van een planetair magnetisch veld beschermt

ons tegen hoog-energetische straling uit de ruimte, die onze atmosfeer aan zou kunnen tasten, maar tevens ook de oorzaak is van spectaculaire lichtshows op Aarde - de Aurora Borealis/Australis, afhankelijk van of je op het noorderlijk of zuiderlijk halfrond bent. Het magnetisch veld van de zon, behalve dat het de buitenste lagen van de zon's atmosfeer verwarmt, draagt ook bij aan het weer in de ruimte door middel van de zonnewind, coronale massa ejecties (CME), en zonnevlammen die invloed hebben op ruimtemissies, radio- en satellietcommunicatiestoringen en overbelasting van elektriciteitsnetten. Hoewel bacteriën, geleedpotigen, weekdieren en een groot aantal gewervelde dieren reeds lange tijd zich al oriënteerden aan de hand van het magnetisch veld van de Aarde, was het pas in de 11^e eeuw dat de mens voor het eerst een magnetisch kompas gebruikte voor navigatie. Het jaar 1600 was een mijlpaal voor de studie van het aardmagnetisme, door de publicatie van William Gilbert's werk "Over de Magneet en Magnetische Lichamen, en de grote Magneet van de Aarde," dat een experimenteel fundament legde voor de idee van de Aarde als een magneet. Aan het einde van de 17^e eeuw bracht Edmond Halley¹ grofweg de ruimtelijke variatie in het magnetisch veld weer, in een gebied van de Atlantische Oceaan tussen +52° en -52°. De uitbreiding van ons 'magnetisch universum' werd dramatisch versneld in de 20^e eeuw door ontdekkingen van onder meer zonne-magnetisme in 1908, galactisch magnetisme in 1949 en extra-galactisch magnetisme in 1972. Magnetische velden zijn alomtegenwoordig in het universum: op planeten (die een gesmolten kern hebben), sterren (waarvan inelkaar gestorte sterren de grootst bekende veldsterkte hebben in het heelal - ongeveer een miljard keer de sterkte van een MRI scan), accretieschijven, stralen van gas ook wel 'jets' genoemd, interstellaire wolken, overblijfselen van supernova explosies, het ijle gas tussen de sterren, sterrenstelsels, het zeer ijle gas tussen de sterrenstelsels in draadvormige structuren, clusters van sterrenstelsels, en de grootste schaal die clusters van sterrenstelsels met elkaar verbindt. Al deze studies van magnetische velden over een enorm bereik in ruimte en tijd, vallen samen onder de paraplu van *Kosmisch Magnetisme*. Voor meer informatie over Kosmisch Magnetisme verwijst ik de lezer naar *Extreme Cosmos* van Bryan Gaensler en 'the Square Kilometre Array Cosmic Magnetism' website: <https://www.skatelescope.org/magnetism>.

Magnetische velden in sterrenstelsels

In dit proefschrift concentreren we ons op de galactische magnetische velden die door het interstellaire gas zijn geregen. Hierdoor beïnvloedt het magnetisch veld de dynamica en distributie van het gas. De typische sterkte van dit veld is van de orde een micro-Gauss, μG , wat een paar duizend keer sterker is dan het veld in onze hersenen, maar miljoenen keren zwakker dan die van een koelkastmagneet. De structuur van de veldlijnen lijkt ook totaal niet meer op die van een geïdealiseerde dipool als weergegeven in Fig. 6.1. In grote lijnen kunnen magnetische velden geclassificeerd worden naargelang ze zich voordoen op grote schaal of op een relatief kleine schaal. Het magnetisch veld op grote schaal volgt meestal het gas in de spiraalarmen van een sterrenstelsel (zie Fig. 6.2), en reikt

¹van komeet Halley.



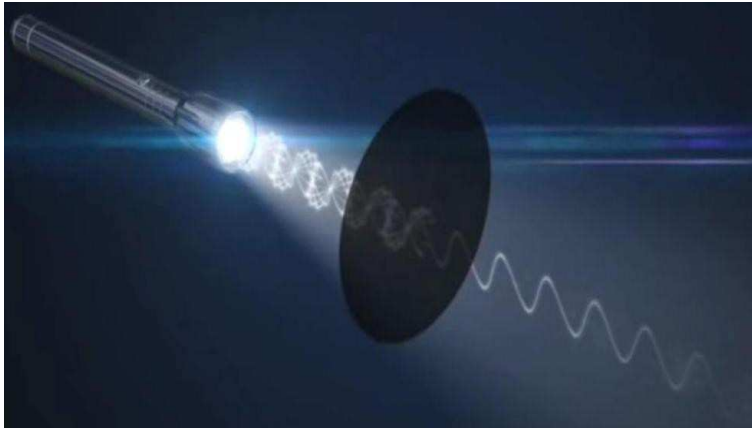
Figuur 6.2: Een spiraalstelsel met verschillende kleurcodering: optisch licht (links), totale radiostraling waarbij rood de hoogste intensiteit weergeeft (midden), en gepolariseerde radiostraling waarbij wit de hoogste intensiteit weergeeft (rechts). Deze afbeeldingen zijn gereproduceerd van de Atlas of Galaxies (MPIfR Bonn) beschikbaar op <http://www.mpifr-bonn.mpg.de>.

tot duizenden lichtjaren ver. In het linkerpaneel van Fig. 6.2 geven de kleine strepen de gemeten oriëntatie weer van het grootschalig magnetisch veld, die de spiraalarmen volgt zoals te zien is in de vergelijking met de afbeelding in het optisch licht. Aan de andere kant, een kleinschalig magnetisch veld bevindt zich in de turbulente omgevingen binnenin spiraalarmen, met een typische grootte van maximaal honderden lichtjaren. Deze schaal is nog steeds vrij groot als je bedenkt dat de afstand tussen de zon en de Aarde acht lichtminuten bedraagt². Ontploffende sterren (supernovae) in spiraalarmen vormen de grootste leverancier van energie en kunnen zorgen voor krachtige, turbulente processen in het interstellaire gas. In analogie met een kosmische tsunami met een golf 200 miljard keer de diameter van de Aarde, wordt de energie verspreid op steeds kleinere schalen via wervelende, turbulente bewegingen in de golf, totdat een grootte van ongeveer tien keer de Aarde is bereikt, waarna de energie uiteindelijk afgevoerd wordt als schuim. Het kleinschalige magnetisch veld verwerft daarmee de afdruk van deze energieverdeling over ruimtelijke schalen of over het energiespectrum

Magnetische velden zijn onzichtbare krachtlijnen, hoe kunnen we dit fenomeen detecteren? Het antwoord ligt in de interactie tussen het magnetisch veld en hoog-energetische deeltjes, ook wel kosmische straling genoemd³. Wanneer zo'n deeltje een magnetisch veld treft, zal het een baan afleggen met een spiraalvorm rond de magnetische veldlijnen (zoals in Fig. 6.1), en zal hierbij een bepaald type straling uitzenden dat synchrotron-

²Een toeval in eenheden heeft een handige analogie tot gevolg: als de afstand zon-Aarde een inch zou zijn, dan correspondeert een lichtjaar met een mijl.

³Dit is geen gebruikelijke straling in de zin van fotonen met een variatie aan energie, zoals röntgenstraling of gammastraling die geen intrinsieke massa hebben, maar eerder deeltjes met een intrinsieke massa. Sommige van deze deeltjes kunnen ultra-hoge energieniveaus bereiken, waardoor hun impact vergelijkbaar is met die van een honkbal gegooid met een snelheid van 97 km/u.



Figuur 6.3: Schematisch overzicht van polarisatie.

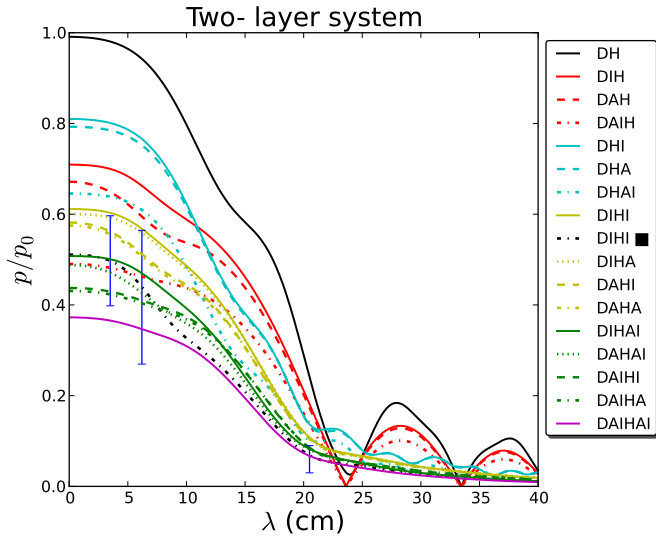
Dit is een snapshot van een animatie over gepolariseerd licht beschikbaar op ‘the European Southern Observatory’ op <https://www.eso.org/public/videos/polarisedlight1>, door ESO/L. Calçada.

straling genoemd wordt. Het middelste paneel in Fig. 6.2 geeft de sterrenstelsel weer in synchrotronlicht. Deze straling bevindt zich in de radio frequenties van het elektromagnetisch spectrum, met een frequentie hoger dan die van FM radio- en televisiesignalen, maar duizenden malen kleiner dan optisch licht⁴. *Radio-astronomie* is dus cruciaal voor de studie van kosmische magnetische velden.

Een belangrijk aspect van deze straling is dat het in hoge mate lineair gepolariseerd is, wat inhoudt dat de elektromagnetische golven oscilleren met een specifieke oriëntatie terwijl het beweegt langs een rechte lijn (oftewel niet in een cirkel). Zoals te zien is in Fig. 6.3, licht dat uit de zaklamp komt is niet gepolariseerd, omdat het is opgevoerd uit een som van elektromagnetische golven met een willekeurige bewegingsrichting. Echter, als er een filter (weergegeven door de donkere ovaal in de figuur) dat alleen maar verticaal gepolariseerd licht doorlaat, wordt geplaatst in het lichtpad, dan zal het licht daarachter recht naar boven en onder oscilleren zoals te zien in de afbeelding⁵. Vandaar dat de elektromagnetische oscillaties zich uitsluitend beperken tot de bewegingsrichting langs deze verticale vlak in de ruimte en in geen andere richting. Het licht is dus volledig gepolariseerd. Omdat de golf heen en weer beweegt heeft de lineaire polarisatie geen richting (bijv. naar boven of naar beneden) maar slechts een oriëntatie (naar boven en naar beneden). Dit is de reden dat in het linkerpaneel van Fig. 6.2 streepjes zijn weergegeven in plaats van vectoren. Stel dat de filter niet ideaal was en er een lek was zodat sommige andere oriëntaties door het filter konden dringen, dan zou de polarisatie ‘vervuild’ worden en dus gedeeltelijk gepolariseerd zijn. Dit fenomeen leidt tot het concept van de mate van

⁴Net zoals alle elektromagnetische golven reizen radiogolven met de lichtsnelheid.

⁵Eigenlijk wordt hier de elektrische oscillatie van het elektromagnetisch veld afgebeeld; de magnetische oscillaties staan altijd loodrecht op de elektrische oscillaties.



Figuur 6.4: Simulatie van de resulterende mate van polarisatie van synchrotronstraling als een functie van de waargenomen golflengte, voor alle mogelijke configuraties van het magnetisch veld, zoals het uit onze methode volgt.

polarisatie, wat aangeeft hoeveel polarisatie aanwezig is, oftewel, tot op welke hoogte het signaal gepolariseerd is. Terugkomend op de discussie over kosmische straling en magnetische velden, een grootschalig veld resulteert in synchrotronstraling van alle naburige kosmische stralen die nauw gesynchroniseerd zijn in hun oriëntatie, terwijl voor een kleinschalig veld, de naburige oriëntaties eerder willekeurig zijn. Uit deze beschouwing kunnen we al anticiperen op het feit dat een grootschalig magnetisch veld een hogere mate van polarisatie zal bezitten dan een kleinschalig veld. Als we het rechterpaneel van Fig. 6.2 nader bekijken, zien we dat er een hoge mate van polarisatie aanwezig is langs de spiraalarmen, wat overeenkomt met het grootschalig magnetisch veld.

Bovendien kunnen studies van magnetische velden in andere sterrenstelsels, waaronder sterrenstelsels met een zelfde morfologie als die van onze eigen Melkweg, zorgen voor een vogelperspectief op de globale structuur van galactische magnetische velden, die in- of uitgezoomde versies van de globale magnetische veldstructuur van de Melkweg kunnen zijn. Daarentegen, studies van de Melkweg zelf bieden vele malen hogere resolutie ongeëvenaard door elk ander sterrenstelsel.

Bijdragen van dit proefschrift

In dit proefschrift reconstrueren we de eigenschappen van magnetische velden in spiraalstelsels gebruikmakend van de polarisatie van synchrotronstraling. Het doel van dit

onderzoek is de structuur van het magnetisch veld te ontrafelen over diverse ruimtelijke schalen in onze Melkweg (zie Hoofdstuk 2), en de sterkte en structuur van magnetische velden in andere sterrenstelsels te karakteriseren (Hoofdstuk 3-5).

In Hoofdstuk 2 gebruiken we nieuwe simulatiemethoden om te bepalen wat de intensiteit is van zowel de totale synchrotronstraling als die van de gepolariseerde straling als een functie van diverse eigenschappen van het numeriek gegenereerde turbulente, magnetisch veld en interstellair gas. Daarna vergelijken we de resulterende distributies in de structuur over verschillende resoluties van aan de ene kant de synchrotron-intensiteit met aan de andere kant het turbulente magnetisch veld. Uit dit experiment volgt dat de totale intensiteit het turbulente magnetisch veld volgt in termen van distributies van structuren, maar dat de onzekerheid in de observaties een voorspelling onzeker maken. Een voorspelling die we wel kunnen maken is dat voor zekere frequenties waarop waarnemingen gesimuleerd zijn, de polarisatie-intensiteit twee verschillende structuurdistributies kan aannemen, in plaats van een enkele. De karakteristieke schaal waar op deze splitsing optreedt is afhankelijk van de frequentie. Deze relatie kan gebruikt worden als een mogelijke indicator voor de bepaling van parameters die de turbulentie beschrijven.

In Hoofdstukken 3 en 4 concentreren we ons op het extraheren van informatie aangaande groot- en kleinschalige magnetische velden uit polarisatiekaarten voor een specifiek sterrenstelsel met meerdere waarnemingsfrequenties (oftewel, meerdere waargenomen golflengtes). We stellen een wiskundig raamwerk op die tegelijkertijd de invloed beschrijft van diverse belangrijke mechanismen voor de waargenomen mate van polarisatie van het synchrotronsignaal. Een eerste voorbereidingsstudie is uitgevoerd als een ‘proof of concept’ van onze methoden. Alle unieke combinaties van onze modellen zijn toegepast zoals te zien is in Fig. 6.4. Het diagram geeft de mate van polarisatie tegen de waargenomen golflengte (in centimeter). De legenda geeft de verschillende modellen weer. De blauwe, verticale lijnen staan voor de observaties samen met de onzekerheid in die observaties. De modelcurves die door alle datapunten gaan zijn meer plausibel dan de andere modellen. We modelleren een sterrenstelsel ook als een boterham met verschillende lagen, bestaande uit een variërend aantal interstellair gaslagen. Vervolgens passen we onze modellen toe op de gehele sterrenstelsel zodat we voorspellingen kunnen maken voor de groot- en kleinschalige structuur van de magnetische veldsterkte.

In Hoofdstuk 5 modelleren we zogenoemde ‘X-vorm’ magnetische velden in sterrenstelsels die uitstekende multi-golflengte data beschikbaar hebben. Recent onderzoek heeft uitgewezen dat in de buitenste regionen van een sterrenstelsel een grootschalig, verticaal magnetisch veld aanwezig kan zijn, met een richting die uit het sterrenstelsel wijst. Men denkt dat dit fenomeen vaak voorkomt in spiraalstelsels en dus moet deze complexe structuur meegenomen worden. Ons ab-initio model geeft waarden voor de grootschalige magnetische veldsterkte die consistent is met literatuurwaarden, maar alleen als er extra complexiteit aan het model toegevoegd wordt.