
Samenvatting

De biochemie op Aarde maakt voornamelijk gebruik van chirale moleculen. Deze chiraliteit is bepalend voor het functioneren van biologische systemen. Chirale moleculen in hun meest simpele vorm kunnen linkshandig (L-) of rechtshandig (D-) zijn en worden enantiomeren genoemd. Zodra moleculen toenemen in grootte zijn de chirale varianten in overmaat. In niet-biologische systemen is het voorkomen van de links- of rechtshandige versie gelijk (racemaat). In het leven zelf is dit voorkomen uit balans en is met name slechts één van de twee enantiomeren aanwezig (homochiraliteit): zo zijn vrijwel alle aminozuren linkshandig en zijn bijna alle suikers rechtshandig. Hiermee is homochiraliteit een unieke en karakteristieke eigenschap van het leven zelf.

De chiraliteit van moleculen leidt tot een specifieke interactie tussen de moleculen en licht. Bij een linkshandig en een rechtshandig molecuul geeft zowel het verschil in absorptie van links- of rechtsdraaiend circulair gepolariseerd licht, als de gecreëerde circulaire polarisatie een golflengte afhankelijk spectrum dat volledig tegenovergesteld is. Hierdoor zijn in mengsels van niet biologische moleculen netto geen signalen zichtbaar, maar zijn die wel duidelijk aanwezig in mengsels van (homochirale) biologische moleculen. Zodoende kan dit verschil van een afstand gemeten worden.

Doordat homochiraliteit uitsluitend voorkomt in leven en in moleculen die hun oorsprong hebben in biologische systemen kan het meten ervan gebruikt worden om de aanwezigheid van leven aan te tonen op andere planeten. Fotosynthetische organismen, zoals planten, komen veelvuldig voor op het oppervlakte van de Aarde en zijn het enige leven op het oppervlakte dat zichtbaar is vanuit de ruimte. Daarom heb ik in deze dissertatie de polarimetrische respons van fotosynthetische organismen bestudeerd in het zichtbare licht en in het nabij infrarood.

In **Hoofdstuk 1** geef ik een korte algemene inleiding tot deze dissertatie en introduceer ik de astrobiologie, biosignaturen en de detectie hiervan op afstand. Deze onderwerpen worden verder uitgediept in **Hoofdstuk 2**. In dit hoofdstuk beschrijf ik de oorsprong van het leven en hoe zich

dat verhoudt tot de homochiraliteit ervan. Vervolgens bediscussieer ik de interactie tussen chirale moleculen en de polarisatie van het licht en worden de belangrijkste mechanismen besproken die bijdragen aan dit optische fenomeen. Afsluitend bespreek ik de overwegingen voor het meten van polarisatie op afstand en wat de hedendaagse en toekomstige mogelijkheden en euvels zijn.

In **Hoofdstuk 3** wordt het circulair spectropolarimetrische instrument 'TreePol' beschreven. TreePol is ontwikkeld voor gevoelige polarimetrische metingen in zowel het laboratorium als buiten. Ook wordt de chiroptische evolutie van verwelkende bladeren beschreven. Hierbij was een afname in het circulaire polarimetrische signaal zichtbaar terwijl de pigmentconcentraties min of meer gelijk bleven. Het verband tussen het signaal en het leven of dood zijn van een plant laat goed de robuustheid van circulaire polarisatie als biosignatuur zien. Tevens is het wellicht in de toekomst mogelijk deze techniek in te zetten bij, bijvoorbeeld, satellietobservaties van vegetatie op Aarde.

Bladeren hebben een complexe en heterogene structuur. Naast de polarimetrische signalen die gevormd worden door de moleculen kan de vorm en structuur van de bladcellen zelf polarisatie maken en veranderen. Een dergelijke complexe samenhang kan het best beschreven worden met complete Mueller matrix polarimetrie daar deze techniek het meest omvattend de polarimetrische diversiteit kan weergeven. In **Hoofdstuk 4** bespreek ik de lineaire en circulaire polarisatiemetingen van esdoorn en mais bladeren in combinatie met hun Mueller matrices en de decomposities daarvan. Duidelijke kenmerken zijn zichtbaar in diattenuatie, gecreëerde polarisatie, retardatie en depolarisatie. Interessant genoeg laat het circulair gepolariseerd spectrum alleen een sterk negatief signaal zien langs en op de nerven, terwijl een gesplitst negatief-positief signaal gangbaar is. Mogelijk ontstaat dit verschil door de oriëntatie van de chloroplasten langs en ten opzichte van de nerven.

Algen zijn een zeer belangrijke component van de wereldwijde fotosynthese en zijn evolutionair de voorgangers van de planten. Terwijl er tussen planten over het algemeen weinig variatie kan worden waargenomen in het circulaire polarisatiespectrum zijn er tussen algen sterke verschillen waarneembaar. Dit wordt met name veroorzaakt door de grotere verschillen in fotosynthetische systemen. In **Hoofdstuk 5** heb ik circulair spectropolarimetrische metingen gedaan aan een verscheidenheid van meer-cellige algensoorten die representatief zijn voor hun grotere, evolutionair gedefinieerde groep (groene, rode of bruine algen) en vergelijk deze met metingen aan hogere planten. Opmerkelijk genoeg zijn de chloroplasten van

deze algen veel primitiever maar kan de sterkte van het signaal veel groter zijn; tot wel 2%.

In de voorgaande hoofdstukken heb ik circulair polarimetrische spectra gemeten in het laboratorium. De volgende stap was het meenemen van speciaal ontwikkelde polarimeters naar buiten om aldaar te meten. Doordat er buiten grote verschillen kunnen zijn in belichting en wind de vegetatie kan bewegen is een snelle modulatie noodzakelijk. Daarbijkomend kan veel lineaire polarisatie gecreëerd worden (>10%), dat gescheiden moet worden van de circulaire polarisatie. In **Hoofdstuk 6** heb ik onderzoek gedaan naar de circulaire polarisatie van vegetatie buiten in het veld met gebruik van zonlicht. Een duidelijk verschil tussen levend en niet levend materiaal was zelfs zichtbaar onder zulke complexe condities.

In de algemene discussie in **Hoofdstuk 7** wordt het onderzoek uit deze dissertatie in een bredere context gezet. De circulaire polariserende eigenschap van leven lijkt belovend voor de detectie van buitenaards leven. Mogelijk zijn er ook toepassingen voor monitoren van leven op aarde. Hoewel het onderzoek in deze dissertatie een stap is richting zulke toepassingen, is meer onderzoek noodzakelijk. Daarom geef ik in dit hoofdstuk ook aanbevelingen voor toekomstig onderzoek.