Chloroplasten als actieve materie

Planten zijn vreemd. Ze lijken niet veel te doen, maar toch is bijna elk levend organisme op aarde afhankelijk van ze om te overleven. Biologen bestuderen planten al eeuwen, maar vanuit de natuurkunde is er historisch gezien niet veel onderzoek gedaan naar deze organismen. Als mensen denken aan natuurkundig onderzoek, denken ze vooral aan zwarte gaten, neutronensterren of quantummechanica. Natuurkunde kan ons daarnaast echter ook helpen om biologische systemen te begrijpen en dit is precies waar het onderzoeksveld van de biofysica zich mee bezighoudt.

Afbeelding 1. Diverse planten. Planten zijn er in alle soorten en maten, maar alle

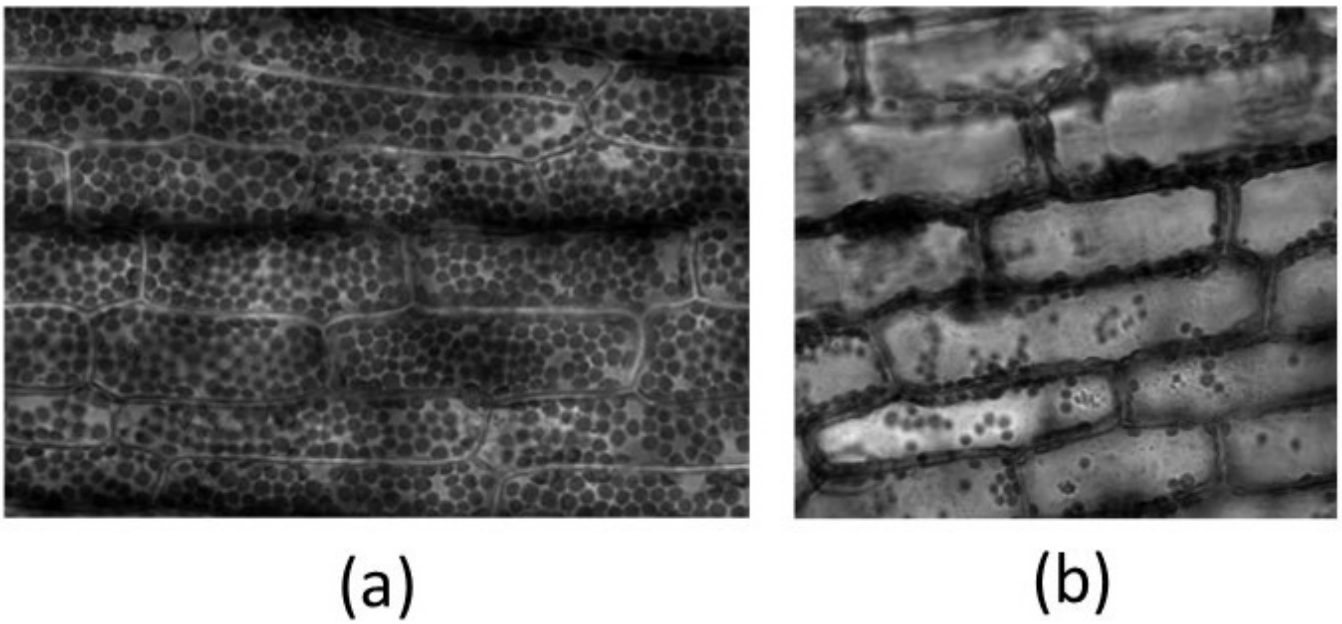
plantencellen bevatten chloroplasten die de plant gebruikt voor fotosynthese. Foto: Cabon_SN.

Ik ben zelf een van die gekke natuurkundigen die geïnteresseerd is in biofysica. Tijdens een labbezoek aan de FluidLab-groep van Mazi Jalaal aan de Universiteit van Amsterdam, liet Mazi mij zien dat chloroplasten in plantcellen bewegen als er licht op de plant wordt geschenen. Ik vroeg mij direct af wat daar aan de hand was, en heb toen besloten om dit te onderzoeken voor mijn masterscriptie, het onderzoeksproject waarmee je als natuurkundestudent je studie afsluit.

Plantencellen bevatten kleine biologische machines genaamd *chloroplasten*. Chloroplasten kun je beschouwen als de batterijen van plantcellen. Ze zorgen ervoor dat planten, en dus indirect wij, in leven kunnen blijven. Ze doen dat door energie op te wekken voor de plant in de vorm van glucose. Dit gebeurt tijdens een welbekend proces genaamd *fotosynthese*, waarbij zonlicht wordt gebruikt om koolstofdioxide en water om te zetten in glucose. Hierbij wordt de zuurstof vrijgegeven die wij nodig hebben om te ademen. Het feit dat dit hele proces plaatsvindt in chloroplasten maakt ze interessant vanuit een biologisch oogpunt, maar waarom zou een natuurkundige geïnteresseerd zijn in chloroplasten? De reden daarvoor is dat chloroplasten op verschillende manieren kunnen bewegen, afhankelijk van het soort licht dat op de plantencel schijnt – en als natuurkundige ben ik beroepshalve verplicht om bewegende objecten interessant te vinden.

Laat ik kort uitleggen hoe dit werkt. Chloroplasten zijn heel gevoelig voor verschillende lichtintensiteiten. Te fel licht kan de chloroplasten beschadigen en te zwak licht zal ervoor zorgen dat fotosynthese niet goed kan plaatsvinden. Jammer genoeg kunnen planten niet snel van het licht af of naar het licht toe bewegen als de lichtintensiteit in hun omgeving verandert. Gelukkig is de natuur fantastisch en hebben planten een mechanisme ontwikkeld om alsnog controle te kunnen hebben over de hoeveelheid licht die op de chloroplasten valt. Dit mechanisme maakt gebruik van de beweging van de chloroplasten zelf. Als er licht van te lage intensiteit op de plantencel valt, verplaatsen de chloroplasten zich naar de gebieden in de cel waar het licht het felst is. Dat zijn de boven- en onderkant van de cel. Hier zullen de chloroplasten zich uitspreiden om de hoeveelheid licht die elke chloroplast krijgt te maximaliseren. Het is alsof de chloroplasten aan het zonnebaden zijn. Dit wordt de **accumulation response** genoemd, de verzamelingsreactie dus – zie afbeelding 2a. Als licht

van hoge intensiteit op de plantencel schijn, zullen de chloroplasten de gebieden met het felste licht juist vermijden. Ze bewegen naar de zijkanten van de cel en gaan daar dan rond in een soort polonaise om aan zo min mogelijk licht blootgesteld te worden. Dit wordt de **avoidance response** genoemd, de ontwijkingsreactie – zie afbeelding 2b.



Afbeelding 2. Beweging van chloroplasten. Bovenaanzicht van Elodea densa (waterpest) cellen. (a) Accumulation response (verzamelingsreactie). De chloroplasten spreiden zich uit over de boven- en onderkant van de cel om hun lichtopname te maximaliseren. (b) Avoidance response (ontwijkingsreactie). De chloroplasten bewegen in rondjes langs de zijkanten van de cel om het felle licht te vermijden. Foto’s gemaakt door Nico Schramma.

Wetenschappers weten al sinds de tweede helft van de 19^{e} eeuw dat chloroplasten op deze manier bewegen. Vanuit een natuurkundig oogpunt snappen we echter nog altijd niet hoe chloroplasten op zo veel verschillende manieren kunnen bewegen. Het meest interessante aan dit systeem is dat chloroplasten beschouwd kunnen worden als actieve materie. Actieve materie is een bijzonder soort materie bestaand uit deeltjes die energie verbruiken om zelf te kunnen bewegen, zonder invloed van externe krachten. Een voorbeeld van actieve materie, naast chloroplasten, is een zwerm vogels. Elke vogel in de zwerm gebruikt energie en kan daardoor uit zichzelf bewegen en dat bepaalt hoe de zwerm als geheel beweegt. Actieve materie is extreem interessant en het gedrag ervan is nog altijd erg slecht begrepen, vooral in biologische systemen. Daarom ben ik, samen met mijn begeleiders Mazi Jalaal en Nico Schramma, gaan duiken in de wereld van bewegende chloroplasten. Daarbij stuitte ik echter

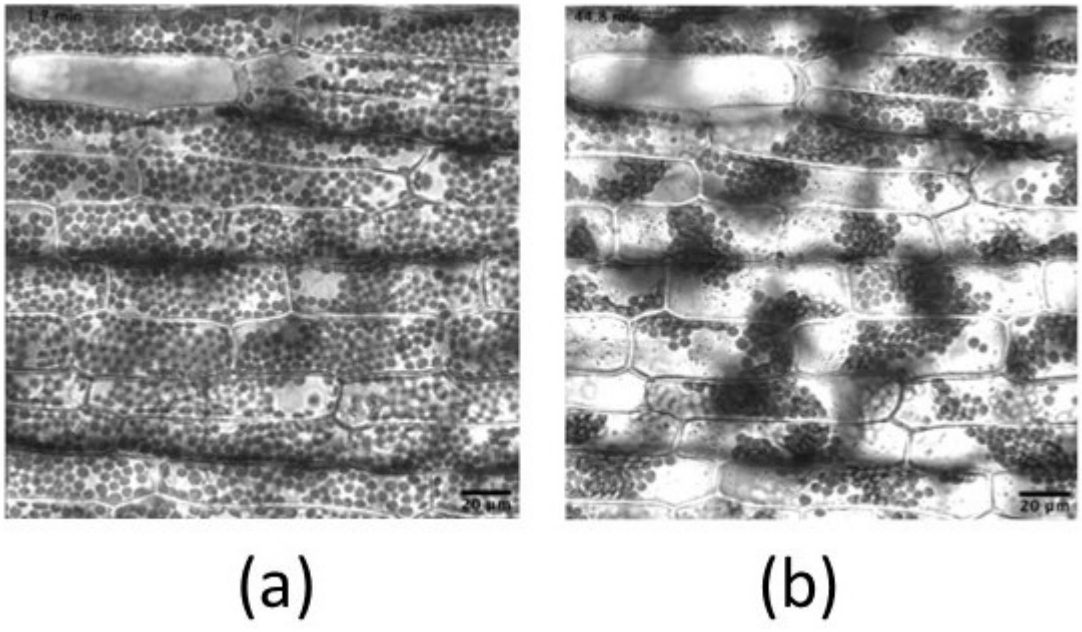
al snel op een klein probleem. Chloroplasten kunnen op zoveel verschillende manieren bewegen, dat het onmogelijk was om alles te bestuderen tijdens mijn masteronderzoek. We hebben dus besloten om te focussen op een specifiek soort beweging die Nico al aan het bestuderen was op de dag dat ik het lab voor het eerst bezocht. We besloten dit de **dim-light adapted state** – aan schemering aangepaste toestand – van chloroplasten te noemen. We bedoelen hiermee chloroplasten die langere tijd zijn blootgesteld aan licht met een lage intensiteit – zie afbeelding 2a. Hierbij zijn de chloroplasten helemaal uitgespreid over de cel, maar af en toe kunnen sommige chloroplasten wel bewegen naar een andere plek in de cel.

Het onderzoek is begonnen met heel mooie experimenten die Nico heeft gedaan op de waterplant *Elodea densa*, ook bekend als waterpest. Hij heeft de chloroplasten in de plantencel gefilmd en aan de hand van deze video's de eigenschappen van de beweging van de chloroplasten in kaart gebracht. Hier kwam iets enorm interessants uit, namelijk dat chloroplasten in de dim-light adapted state vlakbij een *glasovergang* zitten. Dat klinkt misschien vreemd, maar ik zal wat achtergrondinformatie geven om dit te verduidelijken. Als natuurkundigen het over glas hebben, dan hebben we het niet over het materiaal waar je ramen van zijn gemaakt, maar over een toestand ('fase') van materie, net als vast, vloeibaar en gas. De deeltjes in een glas hebben niet een mooie, nette structuur zoals de deeltjes in een vaste stof, maar ze hebben ook minder bewegingsvrijheid dan de deeltjes in een vloeistof. Een glas kun je dus zien als een heel rommelige vaste stof. De glasovergang is nu de overgang van de vloeibare naar glasfase. Misschien denk je wel: dat klinkt bizar, hoe kan iets biologisch ooit een glas zijn? Dat is inderdaad vreemd, maar het komt redelijk vaak voor. Daarnaast blijkt dat actieve materie de bijzondere eigenschap heeft dat het de glasovergang kan ondergaan door de dichtheid van de deeltjes aan te passen. Ik heb het uitgebreid hierover gehad in een vorig artikel.

Aangezien we hadden gemeten dat chloroplasten in de dim-light adapted state dichtbij de glasovergang zitten, wilden we begrijpen wanneer ze glasachtig of vloeibaar zouden zijn. Dat is erg moeilijk om experimenteel te bepalen, dus we hebben besloten een numeriek model te maken om die vraag te bestuderen. Met dit model hebben we gevonden dat chloroplasten afhankelijk van de afstand ertussen in de dim-light adapted state van een glasachtige naar een vloeibare toestand kunnen gaan. Ik zal met een voorbeeld uitleggen hoe dit werkt. Stel je voor dat je naar een concert gaat en van de ene kant naar de andere kant van de zaal wil lopen. Als het concert is uitverkocht, zal de zaal heel vol zijn en zal het lastig zijn om rond te

lopen. Je zult dan steeds tegen iemand aanbotsen en je voortgang zal langzaam zijn. Als er daarentegen maar weinig mensen zijn, dan kun je makkelijk van de ene naar de andere kant van de zaal lopen zonder tegen iemand aan te botsen. Dit is ongeveer wat chloroplasten meemaken als ze in een glasachtige of vloeibare toestand zijn. Als naburige chloroplasten heel dichtbij elkaar zijn, zullen ze niet veel ruimte hebben om te bewegen en ze zullen dus vastzitten. De chloroplasten zijn dan een glas. Als de naburige deeltjes ver weg van elkaar zijn, hebben ze veel bewegingsvrijheid. De chloroplasten zijn dan in vloeibare toestand. We hebben hier een (nu nog ongepubliceerd) artikel over geschreven; geïnteresseerden kunnen dat hier vinden.

Ik vond dat dit al een goede hoeveelheid nieuw vergaarde kennis was voor een scriptie, maar ik was op dit punt nog maar een half jaar bezig en moest een heel jaar vullen. Aangezien we eigenlijk alleen maar de accumulation response hadden onderzocht, stelde ik voor om ook naar de avoidance response te kijken. Nico had namelijk ook heel leuke filmpjes gemaakt waarin we konden zien hoe chloroplasten in cellen die eerst in het donker waren begonnen te clusteren, en hoe deze clusters bewogen als er opeens fel licht op de cel viel. Je kunt dit zien als chloroplasten die een dutje aan het doen zijn in het donker en, als er opeens fel licht wordt aangedaan, schrikken en clusters beginnen te vormen die vervolgens in de cel bewegen. We besloten om dit de **dim-to-bright light transiton –** zwak-naar-fel-lichtovergang – te noemen. In afbeelding 3 kun je zien hoe dit eruitziet.



Afbeelding 3. Dim-to-bright light transition (zwak-naar-fel-

lichtovergang). Bovenaanzicht van Elodea densa (waterpest) cellen. (a) Chloroplasten in het donker zijn uitgespreid over de boven- en onderkant van de cel. (b) Chloroplasten vormen clusters nadat er fel licht wordt aangedaan, en deze clusters bewegen. Foto's gemaakt door Nico Schramma.

Aan de hand van de video's besloten we om de dim-to-bright light transition te bestuderen. Dit deel van mijn scriptie was anders dan het eerste gedeelte. In het eerste deel was ons model voornamelijk gebaseerd op metingen en waren het voornamelijk mijn begeleiders die het model bedachten. Voor het tweede gedeelte hadden we echter helemaal geen metingen. Hierdoor hebben mijn begeleiders mij de kans gegeven om zelfstandig een model te ontwikkelen voor chloroplasten in deze toestand. Ik moet eerlijk zeggen dat ik dit heel spannend, maar ook leuk en uitdagend vond. Ik ben begonnen door in de literatuur over de beweging van chloroplasten te duiken. Na het lezen van heel erg veel artikelen is het mij gelukt om, met hulp van Nico, een model te bedenken.

Aangezien we niet wisten waarom chloroplasten bewegende clusters vormen tijdens de dim-to-bright light transition, hebben we besloten om ons nieuwe model te gebruiken om enkele hypotheses over de oorzaak van deze beweging te testen. Ten eerste had ik tijdens het lezen van de vakliteratuur geleerd dat chloroplasten die gedeeltelijk in de schaduw zitten, altijd naar de schaduw toe bewegen als er fel licht op ze schijnt. Dat is vrij logisch, aangezien we weten dat chloroplasten fel licht vermijden. Er is echter iets geks aan de hand: als een chloroplast zich helemaal in het felle licht bevindt, zal deze niet bewegen, maar op zijn plek blijven. Dit suggereert dat het niet de intensiteit van het licht is die de beweging van chloroplasten teweegbrengt, maar het verschil in intensiteit tussen twee verschillende plekken op de chloroplast. Dit noemen we een *lichtgradiënt*. Ten tweede wilden wij begrijpen waarom chloroplasten clusteren als het felle licht aangaat. We wisten dankzij Nico's experimenten dat chloroplasten elkaar schaduw kunnen geven en vermoedden dat dit zou kunnen leiden tot een onderlinge aantrekking tussen de chloroplasten. Dit leek ons een aannemelijke verklaring voor het clusteren. We besloten dus om ons model te gebruiken om deze hypotheses te testen.

Met ons numerieke model hebben we simulaties gedaan van de beweging van een enkel chloroplast-deeltje en de resultaten hiervan hebben we vergeleken met resultaten van

experimenten op chloroplasten uit de vakliteratuur. We ontdekten dat lichtgradiënten inderdaad de beweging van chloroplasten teweegbrengen. Onze eerste hypothese bleek dus correct te zijn! Door naar hypothese nummer twee, het schaduweffect tussen chloroplasten. Hiervoor hebben we simulaties gedaan met tachtig deeltjes. We hebben voor tachtig deeltjes gekozen, aangezien die hoeveelheid vergelijkbaar is met het aantal chloroplasten in een enkele waterpest-cel. We vonden dat het schaduweffect tussen de chloroplasten inderdaad ertoe leidt dat ze clusters gaan vormen. De clusters in onze simulaties bewogen echter helemaal niet, terwijl de chloroplastenclusters in echte cellen heel veel bewegen. Hieruit hebben we geconcludeerd dat het schaduweffect tussen deeltjes nodig is om de chloroplasten te laten clusteren, maar dat dit niet het enige effect is dat een rol speelt bij de beweging die we zien in de plantencel. We moeten dus andere fysische effecten toevoegen aan ons model om de beweging van chloroplasten nauwkeurig te kunnen nabootsen in onze simulaties.

Dit lijkt misschien een tegenvaller, maar dat is helemaal niet zo. Ons model is nog steeds heel nuttig, ook al reproduceert het de beweging van chloroplasten niet helemaal nauwkeurig. Ons model zou in verder onderzoek gebruikt kunnen worden als basis voor een uitgebreider model waarmee we zouden kunnen testen welke effecten daadwerkelijk leiden tot de beweging van chloroplasten die we zien in experimenten. Misschien is het zelfs mogelijk om een vervolgmodel te maken dat alle verschillende soorten bewegingen van chloroplasten kan reproduceren. Dit is echter iets voor de verre toekomst. Ik hoop dat mijn scriptie en ons artikel over de dim-light adapted chloroplasten ertoe zullen leiden dat meer mensen geïnteresseerd raken in dit onderwerp. Verder onderzoek naar de natuurkunde van deze organellen kan ons heel veel leren over de eigenschappen van biologische actieve materie. Dit is niet alleen van belang voor fysici, maar ook voor biologen. Door samen te werken kunnen we veel meer leren over de prachtige wereld om ons heen.

Ben je geïnteresseerd zijn in het lezen van mijn scriptie? Stuur dan een mailtje naar info@quantumuniverse.nl. Daarnaast wil ik aangeven dat mijn scriptiebegeleiders, Nico Schramma en Mazi Jalaal, nog altijd bezig zijn met onderzoek naar de beweging van chloroplasten. De resultaten die ik hier noem zijn dus niet definitief en kunnen veranderen of verkeerd blijken naarmate hun onderzoek vordert.