

# QUANTUMFYSICA

## FOTOSYNTHESE

**Naam:**

**Klas:**

**Datum:**

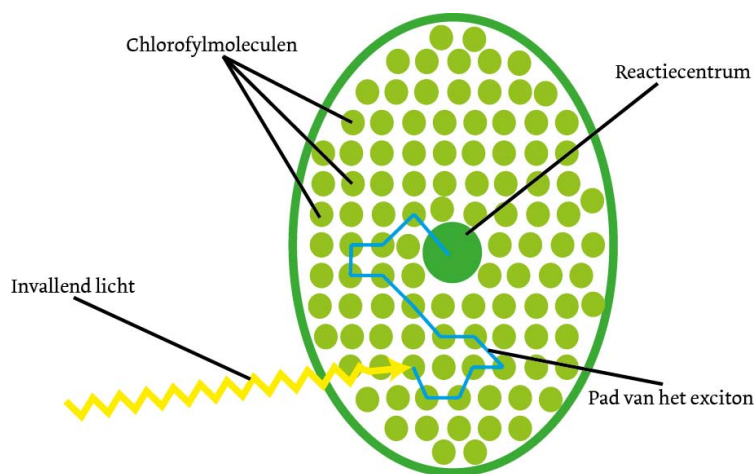
# FOTOSYNTHESE

## ANTENNECOMPLEXEN

Ook in sommige biologische processen speelt quantummechanica een belangrijke rol. Een van die processen is het overdragen van excitatie-energie door chlorofylmoleculen in bladgroen en in algen. Rienk van Grondelle doet in zijn laboratorium op de Vrije Universiteit in Amsterdam onderzoek naar fotosynthese.

Bekijk eerst het filmpje met Rienk van Grondelle over zijn onderzoek op de website <http://www.quantumuniverse.nl/filmpjes>

Bij fotosynthese is een aantal verschillende onderdelen van een cel actief. Het omzetten van koolstofdioxide en water in zuurstof en suikers gebeurt in het **reactiecentrum**. De elektronen die hiervoor nodig zijn, worden vrijgemaakt met behulp van de energie uit zonlicht. Een reactiecentrum kan in zijn eentje echter niet genoeg zonlicht opvangen om voldoende elektronen vrij te maken. Daarom heeft bladgroen zogenaamde **antennecomplexen**. Deze kunnen zonlicht opvangen en omzetten in excitatie-energie. Ze kunnen echter niet zelfstandig zuurstof produceren. De antennecomplexen vangen de energie op en geven deze door tot de energie bij het reactiecentrum komt. We noemen het energiepakketje dat wordt doorgegeven een **exciton**. Het fotoactieve molecuul dat hierbij betrokken is heet **chlorofyl**. Voordat Rienk van Grondelle met zijn onderzoek begon, dachten wetenschappers dat dit proces ongeveer verliep zoals is weergegeven in figuur 1.



**Figuur 1:** De verzameling chlorofylmoleculen die het antennecomplex vormen en het reactiecentrum. In de afbeelding is het klassieke beeld van de overdracht van een exciton schematisch weergegeven.

1.

A. Bespreek in groepen van twee hoe chlorofylmoleculen energie aan elkaar overdragen. Schrijf op wat jullie denken dat er gebeurt.

.....

.....

.....

B. Gebruik wat je al weet over quantummechanica om te beredeneren of het mogelijk is dat de energieoverdracht gericht is naar de chlorofylmoleculen die dichterbij het reactiecentrum liggen.

.....

.....

.....

C. Beredeneer waarom het proces in figuur 1 een klassiek beeld geeft van de overdracht van excitatie-energie, en omschrijf een quantummechanische versie van ditzelfde proces. Hint: bedenk welke rol onzekerheid speelt binnen deze theorie.

.....

.....

.....

## QUANTUMEFFICIËNTIE

Zoals aangeslagen atomen na verloop van tijd weer terugvallen naar de grondtoestand, zo doen ook chlorofylmoleculen dat. Daarbij zenden ze een foton uit met een golflengte tussen de 670 en 720 nm. We noemen dit **fluorescentie**. Als dit gebeurt, kan de plant deze energie dus niet gebruiken voor een fotosynthesereactie, en dus ook niet voor andere levensprocessen. Hoe meer fluorescentie je ziet, hoe inefficiënter de energieoverdracht dus is. In het volgende practicum gaan we kijken hoe efficiënt de energieoverdracht in bladgroen is.



**LET OP!!!** Als je in dit practicum met laserlicht gaat werken, let dan op dat dit veilig gebeurt. Laserlicht kan je ogen permanent beschadigen of zelfs ervoor zorgen dat je blind wordt! Kijk dus nooit recht in de laser en richt de laser ook nooit op andere mensen. Let ook op spiegelende oppervlakken.

*Wat heb je nodig?*

- Een donkere ruimte;
- een groene laserpointer<sup>1</sup>;
- een optisch filter<sup>1</sup>;
- een intensiteitsmeter<sup>1</sup>;
- een oplossing van algen in water;
- een oplossing van algen in aceton (losse chlorofyl).

*Wat ga je doen?*

Eerst ga je de intensiteit van de fluorescentie van losse chlorofylmoleculen uit algen meten, daarna ga je dezelfde meting doen aan de algen waar deze moleculen uit komen. Dat zijn dus chlorofylmoleculen die in de antennecomplexen van algen gebonden zijn. Het verschil tussen deze intensiteiten is een maat voor de hoeveelheid energie die is afgevoerd. Chlorofylmoleculen zijn los in oplossing erg gevoelig voor licht en kunnen door licht snel stuk gaan. Daarom is het belangrijk ze zo lang mogelijk in het donker te laten en pas vlak voor het uitvoeren van de meting uit de verdonkerende verpakking te halen.

### 2.

**A.** Verwacht je dat de losse chlorofylmoleculen een sterkere of minder sterke fluorescentie zullen vertonen dan de gebonden chlorofylmoleculen in de algen? Leg uit.

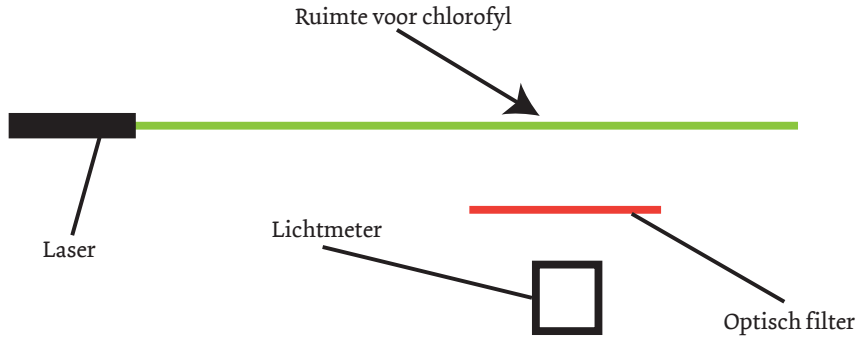
.....

.....

.....

<sup>1</sup>: Afhankelijk van de mogelijkheden op school kan in plaats van deze zaken ook een spectrofotometer gebruikt worden.

Bereid nu in een donkere ruimte de meetopstelling voor zoals aangegeven op onderstaande afbeelding.



**Figuur 2:** Meetopstelling voor fluorescentiemeting.

**B.** Schijn met de laser door de oplossing met de losse chlorofylmoleculen. Beschrijf wat je waarneemt.

.....

.....

.....

.....

.....

.....

**C.** Beredeneer waarom het optische filter nodig is om fluorescentie te meten en waarom het benodigde filter rood is.

.....

.....

**D.** Meet 5 keer de intensiteit van de fluorescentie. Schrijf hieronder je resultaten op. Bereken vervolgens het gemiddelde.

Meting 1: .....

Meting 2: .....

Meting 3: .....

Meting 4: .....

Meting 5: .....

Gemiddeld: .....

We gaan nu op dezelfde manier de fluorescentie meten van het gebonden chlorofyl in de antennecomplexen van algen. De oplossing die je gebruikt hebt voor de vorige meting is gemaakt van deze zelfde algen.

**E.** Schijn nu met de laser door de oplossing met algen. Beschrijf ook hier wat je waarneemt.

.....  
.....  
.....

**F.** Meet weer 5 keer de intensiteit van de fluorescentie. Schrijf hieronder je resultaten op. Bereken vervolgens het gemiddelde.

Meting 1: .....

Meting 2: .....

Meting 3: .....

Meting 4: .....

Meting 5: .....

Gemiddeld: .....

**G.** Vergelijk de gevonden waarde voor de algen met die van de losse chlorofylmoleculen. Geef een verklaring voor het verschil in fluorescentie.

.....  
.....

Het verschil dat je gezien hebt wordt veroorzaakt doordat een gedeelte van de excitatie-energie in de algen naar het reactiecentrum wordt getransporteerd, terwijl de losse chlorofylmoleculen hun energie niet kunnen overdragen en dus weer vervallen naar de grondtoestand. Bij dit verval komt een foton vrij, wat je kunt waarnemen als fluorescentie.

De quantumefficiëntie  $QE$  van een fotoactief proces is gedefinieerd als de verhouding tussen het aantal geproduceerde elektronen  $N_e$  en het aantal geabsorbeerde fotonen  $N_f$ :

$$QE = \frac{N_e}{N_f} \tag{1}$$

**3.**

**A.** Hoe groot is de quantumefficiëntie van de losse chlorofylmoleculen?

.....  
 .....

**B.** Leg met behulp van je antwoord bij opdracht 3A uit waarom de fluorescentie van de losse chlorofylmoleculen een maat is voor  $N_f$  tijdens je meting aan de levende algen.

.....  
 .....

**C.** Beredeneer wat het verband is tussen de grootte die je in opdracht 2F hebt gemeten en het aantal vrijgemaakte elektronen  $N_e$  in de fotosynthesereactie van de gebruikte algen.

.....  
 .....  
 .....

**D.** Laat met een berekening zien dat je  $QE$  ook kunt uitdrukken als

$$QE = 1 - \frac{N_u}{N_f} \tag{2}$$

waarbij  $N_u$  het aantal weer uitgezonden fotonen is.

.....  
 .....  
 .....

- E. Bepaal met behulp formule (2) en je resultaten van opdracht 2 de quantumefficiëntie van fotosynthese in antennecomplexen van algen.

.....

.....

.....

**REISTIJD**

Als het goed is heb je in het practicum een quantumefficiëntie van ongeveer 99% gevonden. Dat betekent dat 99% van de fotonen die worden opgevangen door het bladgroen ook als exciton getransporteerd wordt naar het reactiecentrum en daar wordt omgezet in bruikbare energie.

De losse chlorofylmoleculen houden hun aangeslagen toestand gemiddeld ongeveer een nanoseconde vast voordat ze vervallen naar de grondtoestand.

**4.**

- A. Leg uit dat niet alle excitonen dezelfde levensduur hebben. Hint: denk aan vergelijkbare quantummechanische processen zoals het vervallen van een atoomkern.

.....

.....

- B. We noemen de karakteristieke reistijd die een exciton nodig heeft om bij het reactiecentrum te komen  $\tau_r$ .  $\tau_l$  is de karakteristieke levensduur van een exciton. Beredeneer dat voor een korte tijd  $\tau$ , waarvoor geldt dat  $\tau \ll \tau_l$ , de kans dat de exciton in die tijd vervalt grofweg gelijk is aan  $\tau/\tau_l$ .

.....

.....

- C. Als  $\tau_r \ll \tau_l$ , beredeneer dan je, op basis hiervan, formule (2) ook kunt schrijven als:

$$QE = 1 - \frac{\tau_r}{\tau_l} \tag{3}$$

.....

.....



D. Bepaal met behulp van formule (3) hoe lang de excitatie-energie gemiddeld onderweg is door het bladgroen voordat het bij het reactiecentrum wordt gebruikt. Gebruik hierbij de informatie die je hebt over de levensduur van de excitatie van chlorofylmoleculen en de quantumefficiëntie. Controleer het gevonden antwoord bij je docent.

.....  
.....  
.....

**KLASSIEK OF QUANTUM?**

We weten nu dus hoe lang de energie er in een bladgroenkorrel over doet om het reactiecentrum te bereiken. Aan de hand hiervan gaan we kijken of het mogelijk is dat dit met behulp van klassieke (en dus zonder quantummechanische) processen plaatsvindt. Per reactiecentrum zijn er een paar honderd chlorofylmoleculen in een antennecomplex aanwezig. Een sprong van het ene naar het andere molecuul kost het exciton ongeveer 1-15 picoseconden.

5. Beredeneer op basis van de bovenstaande informatie en de totale reistijd van het exciton (opdracht 4C) of het doorgeven van de energie een klassiek proces kan zijn.

.....  
.....  
.....  
.....

In de volgende opdracht ga je het quantummechanisch doorgeven van energie simuleren met behulp van het volgende applet: <http://www.quantumuniverse.nl/normal-modes>.

6. A. Open het applet. Wat gebeurt er als je op de verschillende knoppen drukt? En als je aan de weergegeven massa's trekt? Blijf voorlopig wel in het eerste tabblad. Beschrijf je bevindingen.

.....  
.....  
.....

Hoewel dit applet niet een quantummechanisch systeem beschrijft maar een klassiek stelsel

van veren en massa's, kunnen we er wel goed in visualiseren welke gevolgen het golfkarakter van de quantummechanica heeft op de overdracht van energie.

**B.** Als iedere massa een chlorofylmolecuul voorstelt, wat wordt er dan gesimuleerd door een van de massa's in beweging te brengen?

.....  
.....  
.....

In tegenstelling tot wat je misschien denkt, simuleert de uitwijking van het molecuul niet de hoeveelheid energie die aanwezig is in dat molecuul. Volgens de quantummechanica kun je namelijk geen zekerheid hebben over hoeveel energie aanwezig is in een specifiek molecuul.

**C.** Beredeneer wat de uitwijking van het molecuul wel voorstelt in deze simulatie. Denk hierbij aan wat je weet over zekerheid en onzekerheid binnen de quantummechanica.

.....  
.....  
.....

In dit eendimensionale model beweegt de energie gericht door het bladgroen. In werkelijkheid is dit echter niet het geval omdat chlorofylmoleculen in een tweedimensionale roosterstructuur zitten en dus meer dan twee buren hebben.

**D.** Wat verwacht je in dit tweedimensionale geval te zien als je een van de massa's een uitwijking geeft en dus een gesimuleerd foton laat absorberen?

.....  
.....  
.....

**E.** Gebruik het tabblad "2 dimensions" om te kijken of je verwachting van opdracht 6D juist was. Beschrijf je bevindingen.

.....  
.....

**F.** Wat denk je dat er gebeurt als de uitwijking van het chlorofylmolecuul in het reactiecentrum groot is?

.....  
.....  
.....

**G.** Bepaal of alle massa's dezelfde uitwijking hebben en dus of alle chlorofylmoleculen dezelfde kans hebben om het exciton te bevatten. Verandert deze kans als je ergens anders nog een foton laat neerkomen?

.....  
.....  
.....

**H.** Deze simulatie past zoals eerder vermeld niet helemaal bij de theorie die we hebben over quantummechanische transport. Geef minstens één manier waarop deze simulatie van dat beeld afwijkt.

.....  
.....  
.....

Zo zie je dus dat door het op quantummechanische manier delocaliseren van de energie (dat betekent dat het niet meer op één plek is, maar op meerdere tegelijk) op een hele efficiënte manier transport kan plaatsvinden. Anders gezegd: de natuur gebruikt de inherente onzekerheid van de quantummechanica om de energie van het exciton op heel veel plekken tegelijk te laten zijn. Als een van die plekken toevallig het reactiecentrum is, kan de energie daar gebruikt worden. De tijdschaal waarop dit proces speelt, is heel erg kort, en daarom heb je ook speciale technieken nodig om naar dit proces te kijken. Zoals je in het filmpje gezien hebt, gebruiken de onderzoekers in het lab van Rienk van Grondelle geavanceerde lasers om onderzoek te kunnen doen naar dit proces.

## ONDERZOEK

Onderzoek doen kost veel geld. Voor de volgende opdracht doe je alsof je een onderzoeker bent in de groep van Rienk van Grondelle. Je wilt graag geld hebben om een nieuwe laser te kopen die heel korte pulsen produceert. Met deze laser wil je onderzoek doen naar het quantummechanische gedrag van chlorofylmoleculen.

7. Schrijf een brief aan de Stichting voor Fundamenteel Onderzoek der Materie (FOM) waarmee je probeert geld te krijgen voor je onderzoek. Zet in een brief van ongeveer 350 woorden duidelijk uiteen waarom je deze laser nodig hebt voor je onderzoek. Zorg dat de volgende zaken aan bod komen:
  - De tegenstelling tussen het klassieke en het quantummechanische beeld van energietransport in het antennecomplex.
  - Wat je tot nu toe weet van de voortgang op het gebied van het onderzoek naar de werking van bladgroenkorrels en welke experimenten je tot nu toe hebt uitgevoerd.
  - De tijdschaal waarop het proces speelt dat je wilt onderzoeken en waarom die tijdschaal relevant is.
  - De minimale eisen die je aan de nieuwe laser stelt in termen van pulslengte.