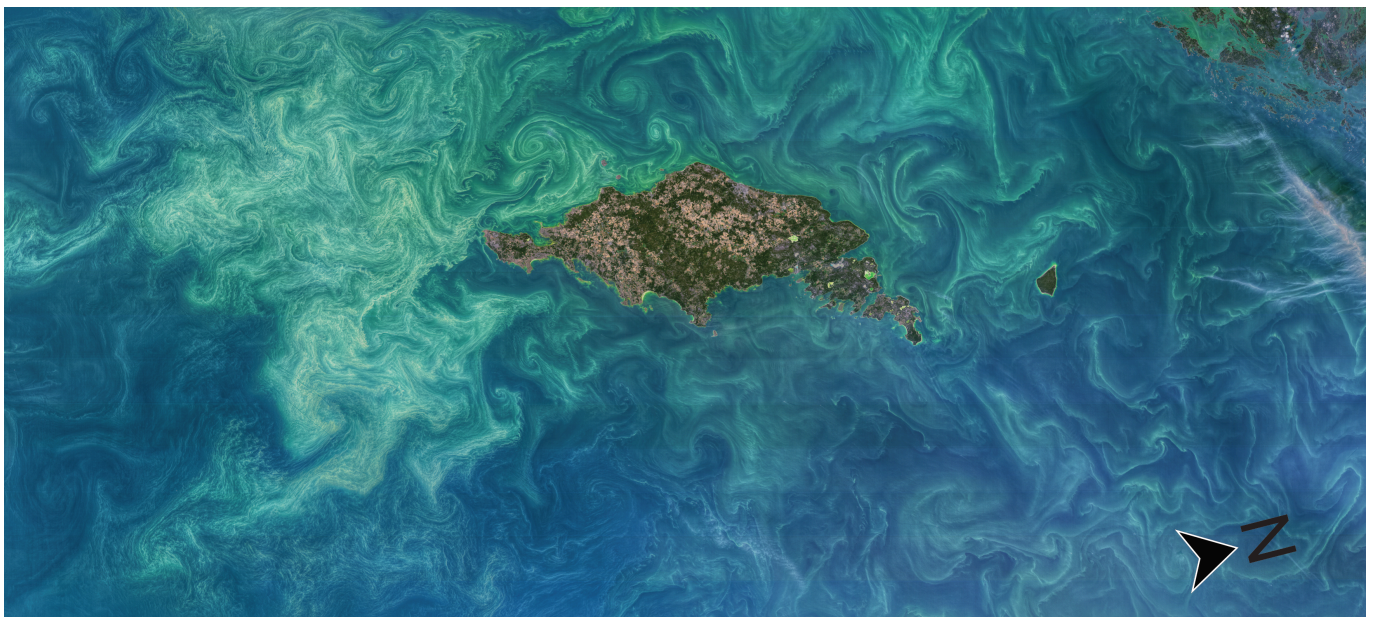


Van quantumvibraties naar kleurrijke bacteriën

Ecologie en quantummechanica liggen op het eerste gezicht nogal ver uit elkaar. Toch kunnen ecologen baat hebben bij een beetje kennis van de natuurkunde van het allerkleinste, zo blijkt uit recent onderzoek. Zo hebben blauwalgen hun kleuren te danken aan de quantumtrillingen van watermoleculen, en kunnen we met deze kennis met satellietdata voorspellen waar je verschillende soorten blauwalg zult vinden.



Afbeelding 1. Blauwalgen in de zee.Blauwalgen rond het Zweedse eiland Gotland, gezien vanuit de ruimte op 15 augustus 2020. Afbeelding: [Gene C. Feldman \(NASA\)](#)

De gemiddelde lezer van The Quantum Universe zal geen bioloog zijn, dus laten we beginnen met het beantwoorden van de vraag “Wat zijn blauwalgen?” Deze organismen, ook wel cyanobacteriën genoemd, hebben hun naam te danken hebben aan de blauwgroene kleur die ze vaak hebben. Als je een slechte bijklank bij de naam ervaart, is dat niet gek: “Sommige blauwalgen zijn giftig en zorgen in de zomer voor veel overlast. Ze kunnen het zwemplezier sterk verminderen en massale vissterfte en stank veroorzaken,” aldus de [Rijkswaterstaat](#).

Dat klinkt niet als een pretje, maar zonder blauwalgen zouden wij waarschijnlijk niet bestaan. Dat zit zo: blauwalgen zijn een van de oudste soorten organismen op aarde. Toen zij (ten minste 3,5 miljard jaar geleden) tot leven kwamen, bevatte de atmosfeer vrijwel geen zuurstof. Doordat blauwalgen miljarden jaren lang koolstofdioxide met gebruik van zonlicht omzetten in zuurstof (via *fotosynthese*), kwam er meer zuurstof in de atmosfeer en konden de eerste planten en dieren evolueren. We hebben dus alles te danken aan deze aloude zuurstoffabriekjes.

Een palet van kleuren

In tegenstelling tot wat hun naam doet vermoeden, zijn blauwalgen niet allemaal blauwgroen. Hoewel we gewend zijn dat planten die fotosynthese gebruiken groen zijn, bestaan er ook gele, oranje en roze blauwalgen. De [kleur](#) die je ziet, geeft weer welke golflengtes van licht *weerkaatst* worden, dus niet geabsorbeerd worden voor fotosynthese. Het meest voorkomende type blauwalg, van het geslacht *Prochlorococcus*, ziet er groen uit omdat het organisme licht absorbeert met behulp van twee fotosynthetische moleculen (chlorofyl A en B) die voornamelijk violet, blauw en rood licht absorberen. Planten gebruiken diezelfde twee moleculen, iets wat ze geërfd hebben van de blauwalgen.



Afbeelding 2. Verschillende kleuren van blauwalgen. Monsters van verschillende

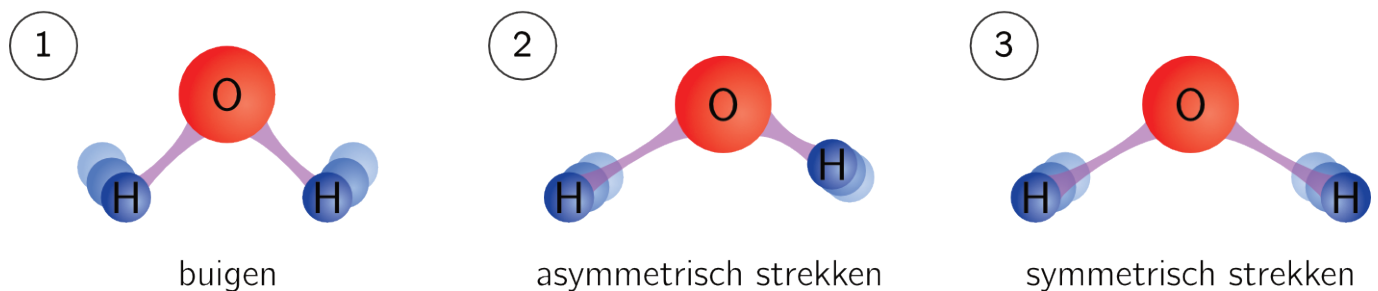
soorten marine blauwalgen. Foto: Laurence Garczarek (CNRS/Sorbonne Université)

Wat doen de gele, oranje en roze blauwalgen dan anders? Deze cyanobacteriële stammen oogsten licht met antennes die bestaan uit verschillende combinaties van drie soorten pigmenten: phycourobiline (PUB), phycoerythrobiline (PEB) en phycocyanobiline (PCB). Deze pigmenten absorberen bij voorkeur respectievelijk blauw, groen en oranje licht. Sommige stammen kunnen zelfs dynamisch aanpassen hoeveel van elke soort pigment ze gebruiken, door de PUB:PEB-verhouding te veranderen als reactie op veranderingen in blauw en groen licht, of hun PEB:PCB-verhouding in reactie op veranderingen in groen en oranje licht. Het zijn dus bacteriële kameleons!

Quantumvibraties

Hoewel het bovenstaande verklaart waar de kleurvariabiliteit van blauwalgen vandaan komt, verklaart dit niet waarom niet-groene blauwalgen überhaupt zouden bestaan. Het antwoord, zo vonden onderzoekers van de Vrije Universiteit, de Universiteit van Amsterdam en Sorbonne Université [1], ligt in de specifieke manieren waarop watermoleculen kunnen trillen. Deze moleculen, bestaande uit één zuurstofatoom gebonden aan twee waterstofatomen, kunnen drie fundamentele soorten trillingsmodi herbergen: buigen, asymmetrisch strekken en symmetrisch strekken.

Quantumtrillingen van water



Afbeelding 3. Quantumtrillingen van water. De drie fundamentele soorten trillingen van watermoleculen. Afbeelding: Jans Henke

Dat we kunnen spreken van ‘fundamentele trillingsmodi’, hebben we te danken aan de quantummechanica. Net zoals de banen van elektronen om een atoomkern [gequantiseerd zijn](#), zo kan een molecuul ook maar op bepaalde manieren trillen, en worden die trillingen alleen aangeslagen wanneer het molecuul precies de juiste hoeveelheid energie absorbeert. Deze energie kan bijvoorbeeld komen uit licht.

De energie van een quantumdeeltje van licht (een *foton*) wordt alleen bepaald door de frequentie van het licht (f), vermenigvuldigd met de [constante van Planck](#) (h): $E = hf$. De hierboven genoemde trillingsmodi kunnen dus worden aangeslagen door licht met heel specifieke frequenties f_1 , f_2 en f_3 , die alle drie overeen blijken te komen met infrarood licht. Hiernaast kunnen ook combinaties van deze trillingen aangeslagen worden, zogeheten *hogere harmonischen*, waarvan de karakteristieke frequenties optellingen van de drie basisfrequenties zijn: $f = Af_1 + Bf_2 + Cf_3$. Enkele van deze hoge harmonischen hebben frequenties in het zichtbare spectrum, waar het meeste zonlicht uit bestaat.

Onderwater-zonlicht

Kort samengevat: een zonnebadend watermolecuul zal licht met bepaalde frequenties, die overeenkomen met de karakteristieke energieën die nodig zijn om een trillingsmodus op te wekken, sterker absorberen. Zonlicht onder het wateroppervlak krijgt hierdoor dalen in zijn [spectrum](#) - oftewel: sommige soorten licht zullen grotendeels ontbreken - waarbij elke dip overeenkomt met een andere harmonische trillingsmodus van watermoleculen. Deze dalen beginnen wellicht als kleine dipjes nabij het wateroppervlak, maar het licht dat bij die frequenties overblijft neemt exponentieel af naarmate de diepte groter wordt.

Het zichtbare spectrum



Wit: hoger harmonische trillingsfrequenties van water

Afbeelding 4. Het zichtbare spectrum. Het spectrum van zichtbaar licht loopt van een golflengte van 400 nm tot 700 nm. De trillingsfrequenties van watermoleculen zijn aangegeven in wit. Afbeelding: Jans Henke

Het beschreven effect 'splitst' het onderwater-spectrum van zonlicht in vijf stukken: paars, blauw, groen, oranje en rood. Met die kennis kunnen we weer terug naar de blauwalgen: deze bevatten licht-absorberende moleculen die precies paars (Chl A), blauw (Chl B, PUB), groen (PEB), oranje (Chl B, PCB) en rood (Chl A) licht absorberen! Het is natuurlijk geen toeval dat blauwalgen juist de pigmenten gebruiken die de beschikbare kleuren absorberen - dat is een gevolg van hun evolutie. Blauwalgen die door toevallige mutaties beter in staat waren de juiste kleuren licht te absorberen konden makkelijker overleven, en zich makkelijker

voortplanten, en verdrongen zo op den duur hun minder goed toegeruste familieleden.

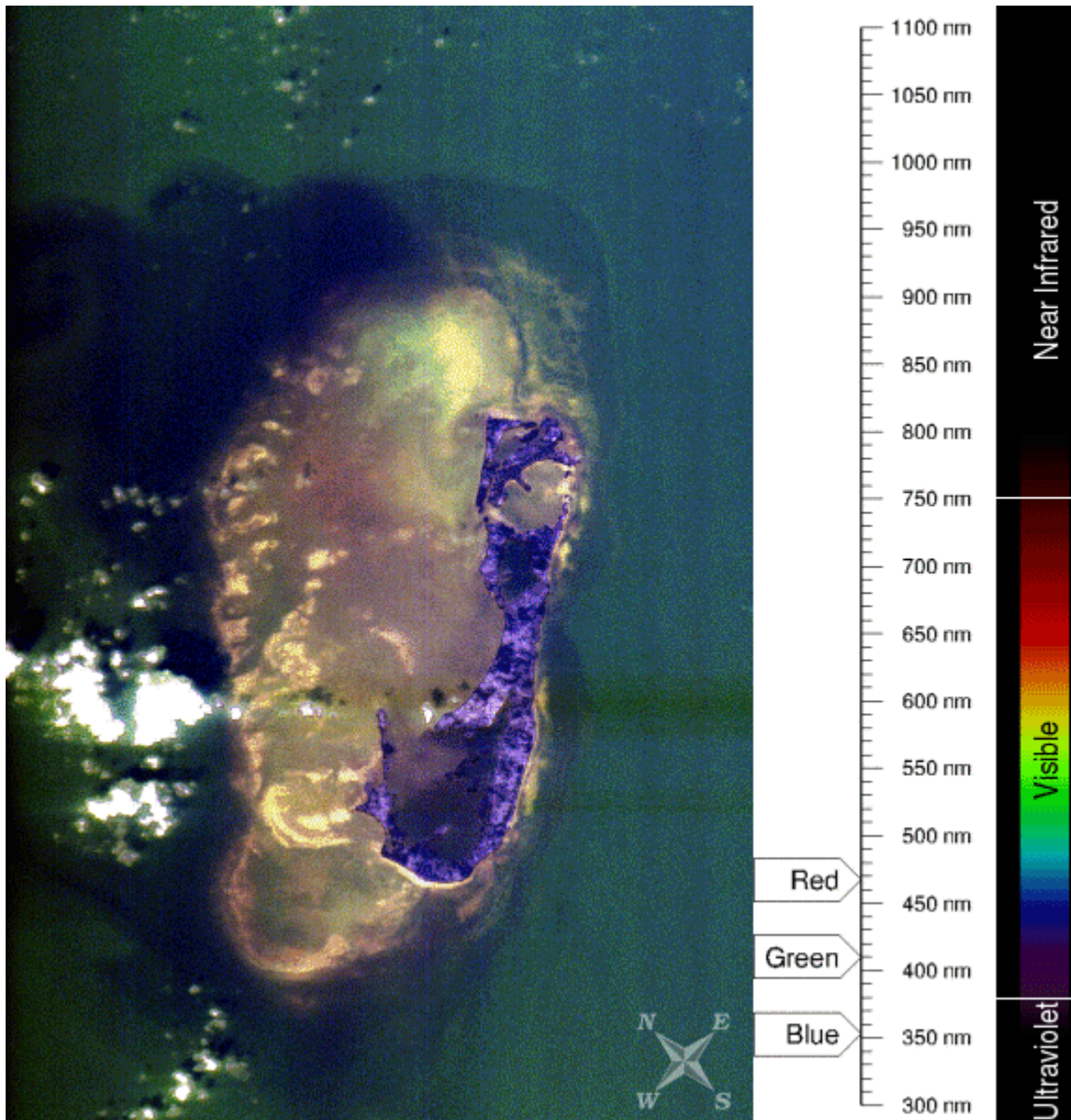
Door nieuwe modellen van onderwater-lichtspectra te vergelijken met de absorptiespectra van verschillende soorten blauwalgen, zie je meteen dat pieken en dalen hierin fantastisch overeenkomen. In deze nieuwe modellen wordt ook meegenomen dat zuiver water licht met lage frequenties (rood en infrarood) sterk absorbeert, terwijl het licht met hoge frequenties (UV, paars en blauw) juist verstrooit. Ook kun je in de vergelijking tussen modellen en de blauwalg-kleuren verschillende aanwezige concentraties van gekleurde opgeloste organische materie (Engels: CDOM) meenemen – materie dat paars en blauw licht sterk absorbeert. De open oceaan heeft bijvoorbeeld weinig CDOM, maar een veenmeer veel; dit verklaart waarom veenmeren er normaal roodbruin uitzien, zelfs als het water helder is.

Beam me up, Scotty!

De gequantiseerde manier waarop watermoleculen kunnen trillen, verklaart dus precies de kleurrijke diversiteit van blauwalgen, en waarschijnlijk ook van andere aquatische fotosynthetische organismen. Dat is niet alleen een interessant weetje. We kunnen deze nieuwe kennis namelijk ook gebruiken om de wereldwijde verdeling en productiviteit van aquatische fotosynthetische organismen te *voorspellen*, uitsluitend op basis van [satellietgegevens](#) van de kleur van water. Door bijvoorbeeld met een satelliet te kijken naar hoeveel licht met de specifieke golflengte van 443 nm wordt geabsorbeerd, waarmee de lokale CDOM concentratie kan worden ingeschat, kan het model van het onderwater licht worden ingezet om te voorspellen hoeveel van elke spectrale niche er per locatie beschikbaar is, en daarmee ook hoe productief verschillende soorten blauwalgen op die locatie zouden zijn.

Dergelijke voorspellingen komen goed overeen met de hoeveelheid verschillende fotosynthetische pigmenten die in oceaan- en meermonsters worden aangetroffen. *Prochlorococcus* en PUB-rijke blauwalgen doen het bijvoorbeeld beter in de donkerblauwe open oceaan, terwijl kameleon-blauwalgen het beter doen langs de CDOM-rijkere kust, en PEB- en PCB-rijke soorten vooral voorkomen in meren. Dit geeft ons ook een beter begrip van de impact van vervuiling en klimaatverandering op deze onderwaterecosystemen. En als we verder kijken dan onze eigen planeet, zouden we dezelfde principes zelfs kunnen toepassen om in te schatten welke kleuren er voor mogelijke fotosynthetische organismen beschikbaar

zijn op [andere planeten!](#)



Afbeelding 5. Een hyperspectrale meting van de zee rond Bermuda.

Deze meting is gedaan vanuit de ruimte bij verschillende golflengtes van licht. De Red/Green/Blue pijlen aan de rechterzijde tonen aan wat de kleurschaal is. Als iets oplicht, reflecteert het licht bij die golflengte. Zwart betekent dat het licht wordt geabsorbeerd (vooral te zien bij langere golflengtes). Zulke metingen kunnen gebruikt worden om te voorspellen waar welke soort blauwalg (of ander fotosynthetisch organisme) te vinden is. Animatie: [Norman Kuring \(NASA\)](#)

[1] T Holtrop, J Huisman, M Stomp, L Biersteker, J Aerts, T Grébert, F Partensky, L Garczarek,

H J van der Woerd. *Nature Ecology and Evolution* **5**, 55-66 (2021). DOI:

<https://doi.org/10.1038/s41559-020-01330-x>