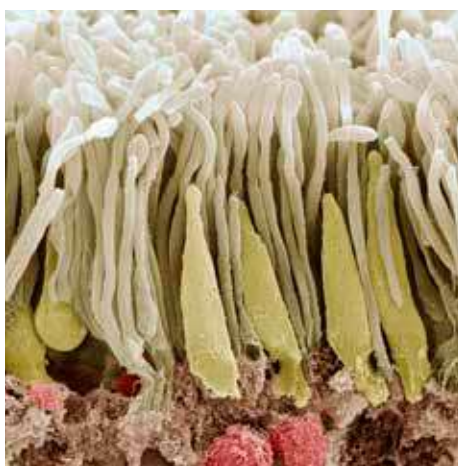


Quantumlesje 13: Kun je een foton zien?

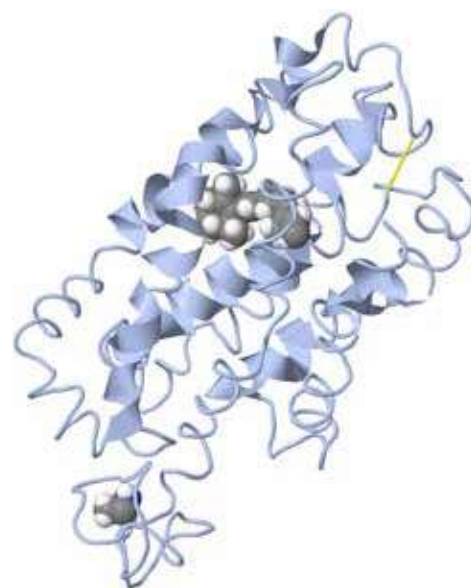
Het oog als quantumsensor

Is je oog gevoelig genoeg om losse fotonen te kunnen zien? In dit artikel zetten we de aanwijzingen daarvoor op een rij. Wat kunnen we leren van het oog over de werking van een quantumsensor?

Voor het waarnemen van licht is een interactie nodig tussen licht en materie. Waarnemen is een uitwisseling van energie tussen die twee. Max Planck opperde in 1900 dat die uitwisseling alleen kan plaatsvinden in discrete stappen die hij *quanta* noemde. Einstein scherpste dit aan met de hypothese dat licht zelf bestaat uit discrete eenheden, die we nu fotonen noemen. Het bestaan van fotonen experimenteel aantonen is complex. In een experiment kunnen we alleen controleren of de toestand van de detector is veranderd. Maar hoe weet je zeker dat de toestand veranderde door de interactie met één foton en niet door toeval? Was het exact één foton of kwamen er twee of drie



Figuur 1. Kegeltjes en staafjes onder een elektronenmicroscop met een vergroting van 3000x. Credit: Eye of Science / Science Photo Library



Figuur 2. Rhodopsine met in het midden retinal (grijs-wit). Bron: Proteopedia

fotonen tegelijkertijd aan? Een goede detector moet dat onderscheid kunnen maken. Naast een detector heb je voor een fotonexperiment een bron nodig die betrouwbaar onderscheidbare fotonen uitzendt. Een gloeilamp voldoet niet. Ook een laser, hoe zwak ook, is geen bron van losse fotonen. Nobelprijswinnaar John Clauser lukte het in 1974 voor het eerst om een bron van losse fotonen te maken. Hij had een dergelijke bron nodig om twee verstrengelde fotonen te produceren voor het uitvoeren van een zogenoemde Bell-test waarmee het bestaan van verstrengeling kan worden aangetoond.

Lichtdetectie door het oog

Ons oog bevat twee soorten lichtgevoelige cellen die zorgen voor het zicht. Een snelle schatting levert op dat er overdag per seconde tussen de 10^{14} en 10^{16} fotonen het oog binnenkomen. Om een enkel foton te kunnen onderscheiden met het oog moeten we dus in het donker werken. In dat geval zijn het de staafjes in het oog die het werk

doen. In een menselijk oog bevinden zich zo'n 120 miljoen staafjes, vooral gevoelig voor groen licht met een piek bij 498 nm. In een staafje bevinden zich meerdere rodopsine-eiwitten. Rodopsine bestaat uit twee stoffen: een opsin en retinal (zie figuur 2).

De absorptie van een foton door retinal kan de dubbele binding tussen het 11e en 12e koolstofatoom verbreken, waardoor een enkele binding ontstaat. Het molecuul kan dan draaien waarna de dubbele binding wordt hersteld. De structuur verandert zo van de isomeer 11-cis-retinal in de isomeer trans-retinal, zie figuur 3.

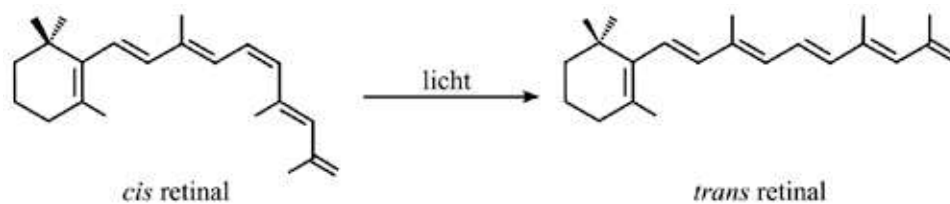
Het rechte, rigide trans-retinal past niet goed in opsin en wordt eruit geduwd. Dit zet een keten van botsingen tussen moleculen in werking (signaaltransductie), wat leidt tot het sluiten van natriumpoorten aan de zijkant van het staafje. Na^+ -ionen verlaten het staafje aan het andere uiteinde, maar er kunnen geen nieuwe ionen meer in. De absorptie van



RUTGER OCKHORST studeerde Technische Natuurkunde aan de TU Delft en werkte daarna ruim 13 jaar in het voortgezet onderwijs. Op dit moment is hij docent en onderzoeker bij de afdeling Science & Engineer Education van de TU Delft. Contact: r.ockhorst@tudelft.nl

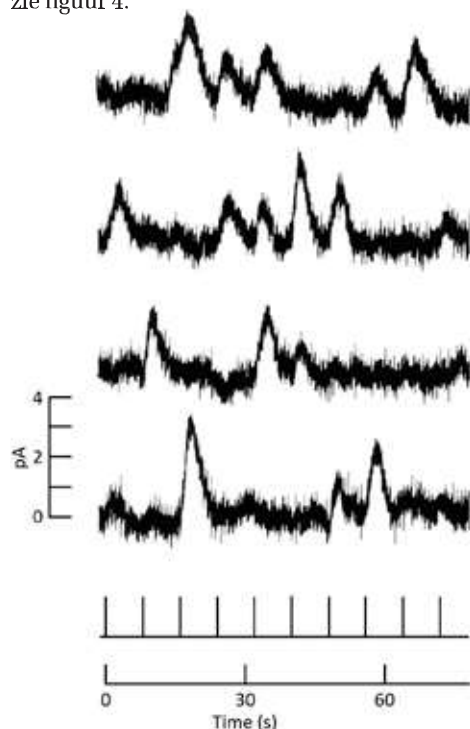


LODEWIJK KOOPMAN promoveerde op de didactiek van quantummechanica. Hij werkt nu als docent natuurkunde op het Scala College in Alphen a/d Rijn en bij de afdeling Science & Engineer Education van de TU Delft. Contact: l.koopman@tudelft.nl



Figuur 3. Retinal vervormt wanneer het een foton absorbeert. Credit: RicHard-59, CC BY-SA 3.0

één foton levert zo een verschil op van 10^5 tot 10^6 Na^+ -ionen. Een versterkingsfactor van ongeveer een miljoen dus! Hierdoor verandert de spanning over het celmembraan ongeveer 1 mV, overeenkomstig met een stroom van 1 pA. Dergelijke stroompjes en spanningen kunnen direct gemeten worden door een staafje in een pipet te beschijnen met licht, zie figuur 4.



Figuur 4. Respons van een staafje op een serie van 40 zwakke lichtflitsen. Bron: Baylor (1979)

Het blijkt dat bij zeer lage lichtintensiteit deze spanning lineair schaalt met het aantal fotonen. Worden er kort na elkaar door verschillende rodopsinemoleculen in hetzelfde staafje twee fotonen geabsorbeerd dan zou het netto-effect dus ongeveer 2 mV zijn. In theorie kun je met een staafje dus onderscheid maken tussen de absorptie van geen, één of twee fotonen.

Efficiëntie en ruis

Helaas gaat bovenstaande vlieger niet zonder meer op. Allereerst zorgt maar zo'n

10% van alle fotonen die een staafje treffen voor een reactie met het retinal. Een signaal dat ontstaat na absorptie van een foton is het gevolg van een versterkingsproces met een stochastisch karakter en levert dus niet steeds hetzelfde spanningsverschil op. Het signaal varieert ruwweg tussen 0,5 mV en 2 mV. Bovendien is er, zoals in ieder systeem, ook ruis. Die ruis komt in twee vormen: discreet en continu. Discrete ruis kan ontstaan doordat rodopsine spontaan door warmte-energie van vorm verandert. Continue ruis is het gevolg van fluctuaties in de hoeveelheid natriumionen die de cel in en uitstromen. Er zijn bovendien meerdere staafjes op dezelfde oogzenuw aangesloten. De losse signalen worden over een bepaalde integratietijd opgeteld, vergelijkbaar met de sluitertijd van een fototoestel. Dus zelfs als individuele staafjes losse fotonen registreren is er nog geen garantie dat de hersenen dat ook kunnen interpreteren.

Proef op de som

Of mensen echt enkele fotonen *in vivo* kunnen waarnemen is een vraag die uiteindelijk experimenteel beantwoord moet worden. Onderzoekers Hecht, Schlaer en Pirenne gingen in 1942 daarom in een donkere kamer zitten om elkaar lichtflitsen van gemiddeld 50 tot 400 fotonen toe te dienen. De proefpersoon van dienst moest zeggen wanneer deze een flits waarnam. Op basis hiervan (over)schatten ze dat interactie met ongeveer 7 fotonen voldoende was om de hersenen een flits te laten registreren. De kans dat bij zo'n zwakke flits twee fotonen op hetzelfde staafje vallen is zo klein dat het vermoeden van de detectie van een enkel foton per staafje al heel aannemelijk wordt. Bij een verbeterde versie van dit experiment in 2018 vertelt de onderzoeker de proefpersoon precies wanneer een lichtflits wordt uitgezonden maar niet in welk oog. Dat wordt bepaald door bijvoorbeeld met een dobbelsteen te gooien. De proefpersoon moet nu aangeven of de flits links of rechts werd waargenomen. Als flitsen niet van de ruis te

onderscheiden zijn verwachten we een 50/50 resultaat. Statistisch significante afwijkingen hiervan versterken het vermoeden dat er echt iets is waargenomen. Als er leerlingen zijn die, eventueel met een muziekje op, vrijwillig meerdere dagen zes uur lang in een donkere kamer willen zitten is dit misschien een aardig onderwerp voor een profielwerkstuk? Op dit moment wordt er gewerkt aan experimenten waarbij een echte quantumlichtbron wordt gebruikt die met zekerheid enkele fotonen produceert. We kunnen dan een mens gebruiken als detector in een Bell-test. Als het lukt om op die manier de Bell-ongelijkheid te verifiëren kunnen we met zekerheid zeggen dat mensen echt een onderdeel zijn van een quantum-universum inclusief verstrengeling.

Verbeteringen aan het ontwerp

De natuur heeft een aantal trucs gevonden om de werking van het oog te verbeteren. Misschien kunnen we daar iets van leren bij het ontwerpen van een fotondetector? Drie voorbeelden ter inspiratie:

- Achter in het kattenog bevindt zich een reflecterende laag zodat licht dat eerst niet wordt geabsorbeerd nog een keer langs de staafjes gaat (Coles, 1971).
- Bij kikkers neemt de ruis af als hun lichaamstemperatuur daalt. Bij een lichaamstemperatuur van 20°C is de spontane isomerisatie van retinal een factor 5 kleiner dan bij 37°C (Haldin et al., 2009).
- De signalen van honderden staafjes worden niet-lineair opgeteld voor transport naar de hersenen. Het signaal van een individueel staafje moet een minimale waarde overschrijden om als signaal in de som meegenomen te worden. Dit heeft een gunstig effect op de signaal-ruis verhouding (Okawa & Sampath, 2007).

Online bijlage

Bij dit artikel is een online bijlage beschikbaar om met leerlingen verder na te denken over de werking van de staafjes in het oog. Zie hiervoor de website van de NVON. In de nlt-module Quantum Ready! vind je meer lesmateriaal over de werking van het oog. Neem voor meer informatie contact op met de auteurs.

De bronnen bij dit artikel staan op de NVON-website. Dit artikel kwam mede tot stand dankzij financiering door Quantum Delta NL. ●