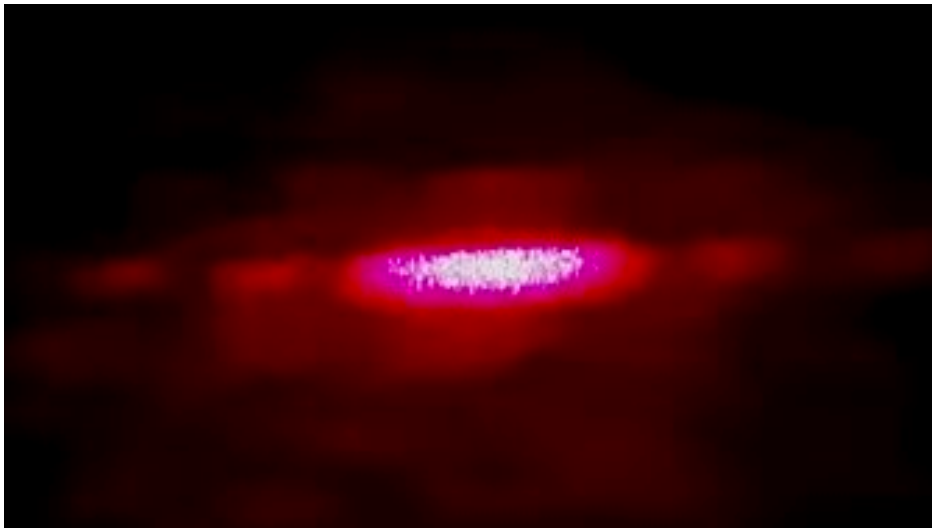


Experimenteren met licht

De grofweg duizend artikelen die je op de Quantum Universe-website kunt vinden hebben één ding gemeen: de redactie heeft bedacht waar ze over gaan. Nu wilden we wel eens weten: waar willen onze lezers eigenlijk meer over horen? Vandaar de rubriek: “Vraag het een natuurkundige”. Het zesde artikel in deze reeks beantwoordt de vraag van lezer Marc: hoe wordt een (quantum-) tweespletenexperiment en/of een meting van de lichtsnelheid uitgevoerd?



Wat is licht? Het is een ogenschijnlijk eenvoudige vraag met een niet zo eenvoudig antwoord. In de zeventiende eeuw laaide een felle discussie op: is licht een golfverschijnsel of bestaat het uit afzonderlijke deeltjes? Christiaan Huygens gebruikte een golfbeschrijving van licht om een verklaring te geven voor de [breking van licht](#), die optreedt wanneer het van het ene materiaal naar het andere overgaat – bijvoorbeeld van lucht naar glas. Lijnrecht tegenover Huygens stond Isaac Newton, die een deeltjesbeschrijving gebruikte om, onder andere, een verklaring te geven voor de scherpe randen van schaduwen. Uiteindelijk bleken beide theorieën een kern van waarheid te hebben, waaruit de opmerkelijke conclusie werd getrokken dat licht zich als een golf én als een deeltje kan gedragen.

Een ander bijzonder aspect van licht is de snelheid waarmee het zich voortplant. Deze

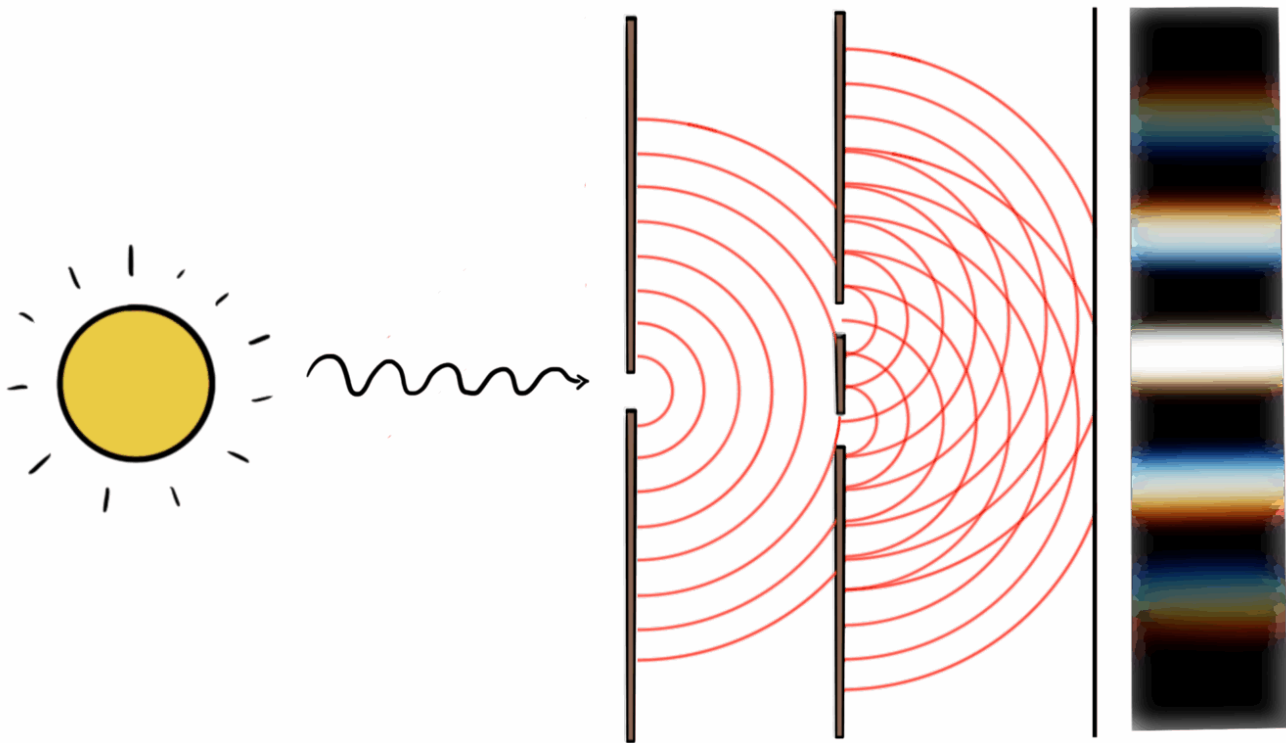
snelheid is voor iedere waarnemer hetzelfde, ongeacht de beweging van die waarnemer zelf. Dit druist in tegen onze intuïtie over snelheden: als je een auto inhaalt, dan zul je die auto langzaam voorbij zien bewegen. Passeer je dezelfde auto in tegengestelde richting, dan flitst de auto in een hoog tempo voorbij. De snelheid waarmee jij de auto ziet bewegen, hangt dus af van je eigen beweging. Voor licht is dit anders. Elke waarnemer meet (in vacuüm) dezelfde [lichtsnelheid](#), namelijk 299.792.458 meter per seconde.

Hoewel de natuurkunde achter licht dus allesbehalve eenvoudig is, bestaan er verrassend eenvoudige experimenten die de genoemde fenomenen inzichtelijk maken. Met relatief simpele middelen – soms niet meer dan alledaagse huis-tuin-en-keukenapparatuur – kunnen eigenschappen zoals het golfkarakter en de snelheid van licht experimenteel zichtbaar worden.

Golf of deeltje?

Het beroemde tweespletenexperiment werd aan het begin van de negentiende eeuw ontworpen door de Britse wetenschapper Thomas Young. Hiermee hoopte Young antwoord te vinden op de vraag of licht zich gedraagt als golf of als deeltje. Over het experiment zei Young (vrij vertaald): “De experimenten die ik zal beschrijven ... kunnen met groot gemak worden herhaald wanneer de zon schijnt, en vereisen slechts apparatuur die voor iedereen beschikbaar is.” De opstelling van Youngs experiment bestaat uit een plaatje met twee smalle spleten, van elkaar gescheiden door een dunne strook, waar zonlicht op valt. Het licht dat door de spleten gaat, valt vervolgens op een muur of ander projectiescherm.

Young observeerde dat het licht dat door de twee spleten gaat een patroon van afwisselend lichte en donkere plekken op de muur veroorzaakt. Dit zogenaamde *interferentiepatroon* is typisch golfgedrag. Wanneer het licht door de twee spleten gaat, ontstaan daar als het ware twee nieuwe ‘bronnen’ van golven van waaruit het licht aan de andere kant van het plaatje verder gaat. Het golfpatroon van de lichtgolven uit deze twee bronnen is vergelijkbaar met het golfpatroon dat ontstaat wanneer je twee stenen in het water gooit: op sommige plekken hebben beide golven een piek en zullen ze elkaar versterken (de lichte plekken), maar op andere plekken heeft de ene golf een piek en de andere een dal, en zullen ze elkaar juist uitdoven (de donkere plekken).



Opstelling van Youngs tweespletenexperiment. Zonlicht valt eerst door een enkele spleet en vervolgens op een dubbele spleet. De spleten fungeren als nieuwe lichtbronnen, waarvan het licht op een projectiescherm (rechts) valt. Op het scherm is een interferentiepatroon van lichte en donkere banden zichtbaar. De gekleurde randen in het patroon komen doordat zonlicht licht van verschillende golflengtes bevat.

Met het experiment van Young leek het golfkarakter van licht dus bewezen, maar de [opkomst van de quantummechanica](#) aan het begin van de twintigste eeuw bracht de golf-of-deeltjediscussie terug. Max Planck liet zien dat licht uit [pakketjes energie](#) bestaat, en Albert Einstein gebruikte het deeltjeskarakter van licht om het [foto-elektrisch effect](#) te verklaren. De tegenstrijdige resultaten van Young aan de ene kant en Planck, Einstein en andere quantumpioniers aan de andere kant, resulteerden in de tegenwoordig bekende [golf-deeltjedualiteit](#): licht gedraagt zich soms als een golf en soms als een deeltje.

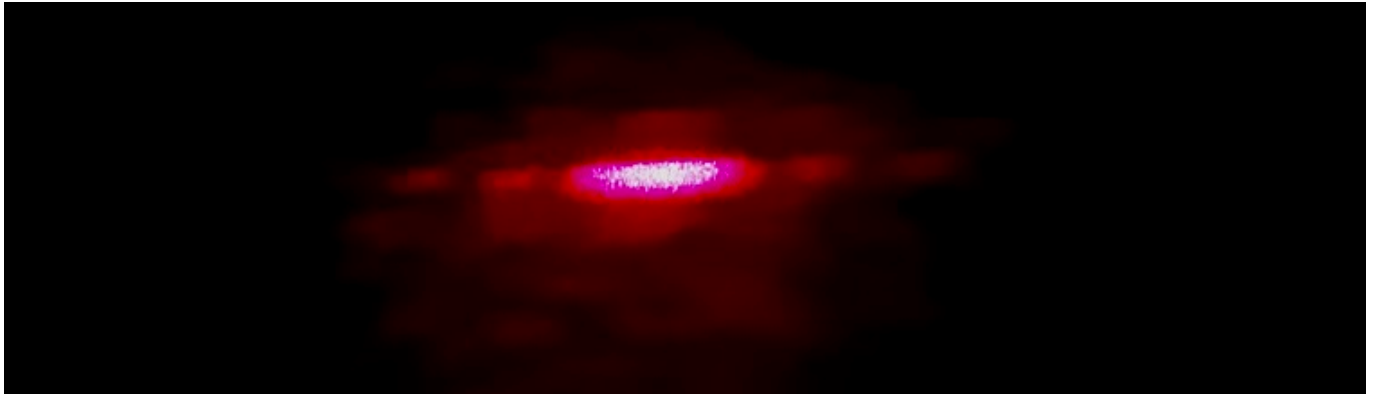
De dualiteit wordt onder andere ondersteund door het werk van de Britse natuurkundige Geoffrey Taylor aan het begin van de twintigste eeuw, die Youngs tweespletenexperiment herhaalde met extreem zwak licht. Als de intensiteit van het licht laag genoeg is, is de verwachting dat de lichtdeeltjes één voor één de spleten passeren. Deze verwachting wordt bevestigd door het scherm achter de dubbele spleet te vervangen door een fotografische

plaat. In eerste instantie zullen op de plaat spikkels voor de afzonderlijke lichtdeeltjes zichtbaar zijn. Hiermee lijkt onomstotelijk bewezen dat licht uit deeltjes bestaat. Wanneer het experiment echter lang genoeg doorgaat, zullen de spikkels een interferentiepatroon gaan vormen, in overeenstemming met het experiment van Young, en dus juist met het golfkarakter van licht.

Doe-het-zelf-tweespletenexperiment

Zoals Young al zei, is er voor het doen van het tweespletenexperiment geen uitzonderlijke apparatuur nodig. YouTube-kanaal Veritasium maakte enkele jaren geleden al een leuke [video](#) waarin het originele experiment met zonlicht wordt gereproduceerd. Het gebruik van zonlicht brengt wel enkele moeilijkheden met zich mee. Als eerste moet al het licht dat op de spleten valt in min of meer dezelfde richting bewegen voor een duidelijk interferentiepatroon. Zonlicht doet dit niet doordat de diameter van de zon te groot is – een probleem dat (deels) kan worden opgevangen door het zonlicht eerst door een enkele smalle spleet te laten gaan voordat het op de twee spleten valt. Het tweede probleem ontstaat doordat zonlicht bestaat uit licht met verschillende kleuren, en dus verschillende golflengtes. Voor ieder van die golflengtes is het interferentiepatroon net iets anders, en het resultaat is dus een wazige samenstelling van alle verschillende interferentiepatronen.

In moderne tweespletenexperimenten wordt vaak gebruik gemaakt van lasers in plaats van zonlicht. In tegenstelling tot de meeste andere lichtbronnen, zenden lasers licht uit in één richting en heeft al het uitgezonden licht dezelfde golflengte. Het experiment is thuis eenvoudig uit te voeren met een laserpointer en een stukje karton, waarin je met een dun mesje twee spleten snijdt op ongeveer één millimeter van elkaar. Voor de quantumversie van het experiment, waarbij je ook de individuele “spikkels” kun zien, is geavanceerdere apparatuur nodig, namelijk een lichtbron die de deeltjes één voor één kan uitzenden en een fotografische plaat die de uitgezonden deeltjes aan de andere kant van de spleten kan detecteren, maar het onderliggende idee van het experiment blijft hetzelfde.



Interferentiepatroon verkregen met een laserpointer en een stukje karton. Op de foto lijkt het patroon ook nog uit spikkeltjes te bestaan, zoals je die alleen bij een quantumtweespletenexperiment zou verwachten. Dit is hier helaas geen quantumeffect, maar een gevolg van de gebruikte (telefoon-)camera.

De snelheid van het licht

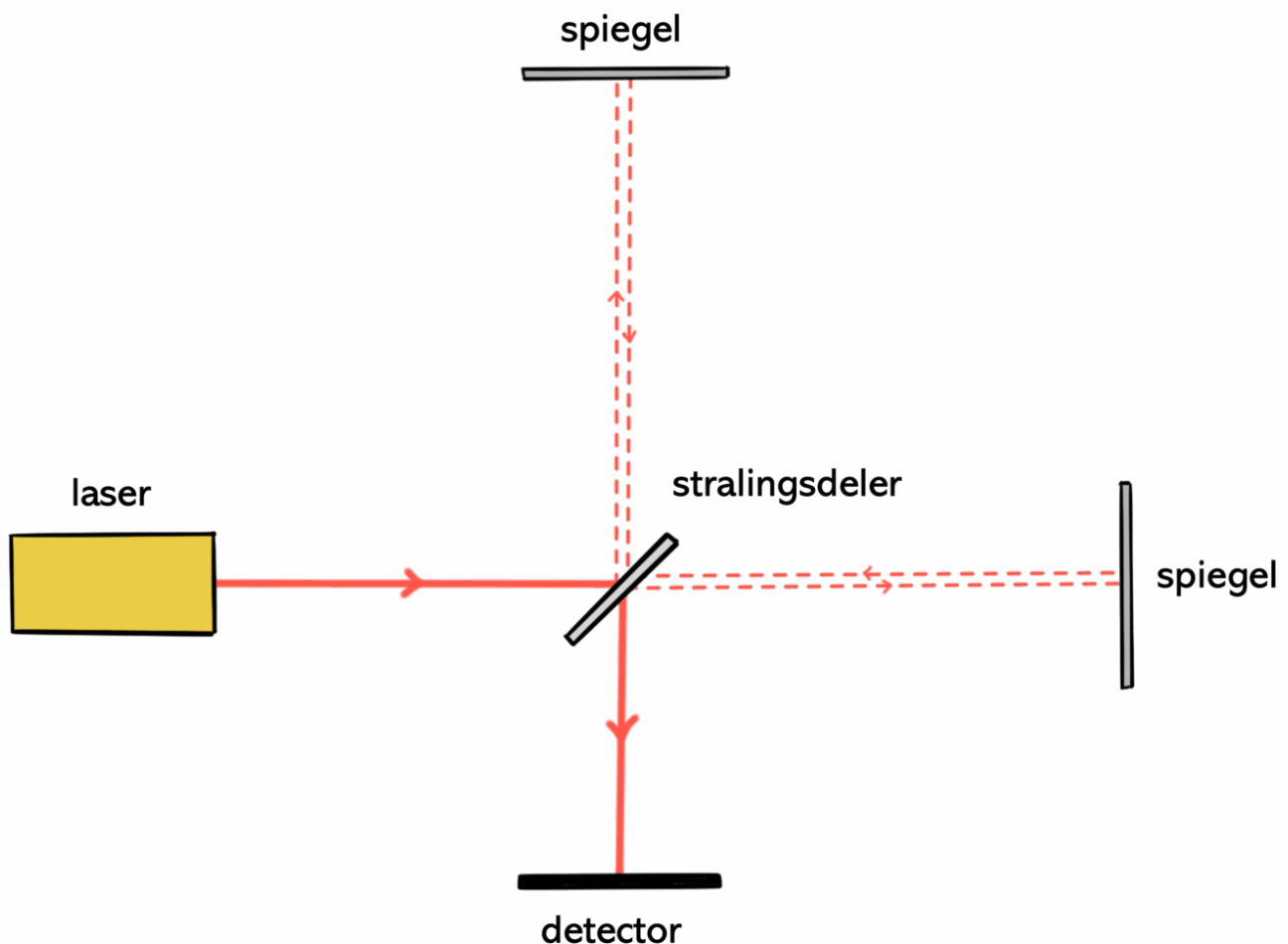
De eerste meting van de lichtsnelheid dateert uit 1676. De Deense astronoom Ole Rømer observeerde de eclipsen (verduisteringen) van de maan Io van Jupiter. Hij ontdekte dat, als de afstand tussen Jupiter en de aarde groot was, het moment waarop de verduistering optrad steeds later was dan voorspeld. Naarmate de afstand tot Jupiter kleiner werd, werden de voorspellingen weer 'correcter'. Rømer beredeneerde dat deze 'fout' in de voorspellingen kwam doordat het licht een langere afstand moest afleggen. Uit zijn metingen leidde hij af dat het licht er elf minuten over doet om van de zon naar de aarde te reizen. De afstand van de aarde tot de zon was in die tijd nog niet heel precies bekend, maar als je met de tegenwoordig bekende afstand rekent komen die elf minuten overeen met een snelheid van zo'n 220.000.000 meter per seconde – niet heel ver van de juiste waarde.

Het experiment van Rømer is opgevolgd door talloze experimenten, waarin de waarde van de lichtsnelheid steeds nauwkeuriger bepaald werd. Een van de nauwkeurigste methoden is *interferometrie*. Hierbij wordt de lichtstraal van bijvoorbeeld een laser opgesplitst in twee stralen met behulp van een spiegel die de helft van het licht doorlaat en de andere helft reflecteert. Beide lichtstralen volgen hun eigen pad en worden weer gecombineerd voordat ze op een detector vallen. Net als in het tweespletenexperiment kunnen de twee lichtgolven elkaar versterken of juist uitdoven. Door de lengte van de paden te variëren en het interferentiepatroon te meten, kan de golflengte – de afstand tussen twee pieken van de golf – worden bepaald. Als de frequentie van het licht ook bekend is, dan kan de lichtsnelheid

berekend worden als

$$(c = \lambda f).$$

In deze formule is c de lichtsnelheid, λ de golflengte en f de frequentie.



Interferometer. Licht van een laser valt op een stralingsdeler die de helft van het licht doorlaat en de andere helft reflecteert. De resulterende lichtstralen worden beide gereflecteerd door een spiegel en komen weer samen. Met de detector wordt het interferentiepatroon van de stralen waargenomen.

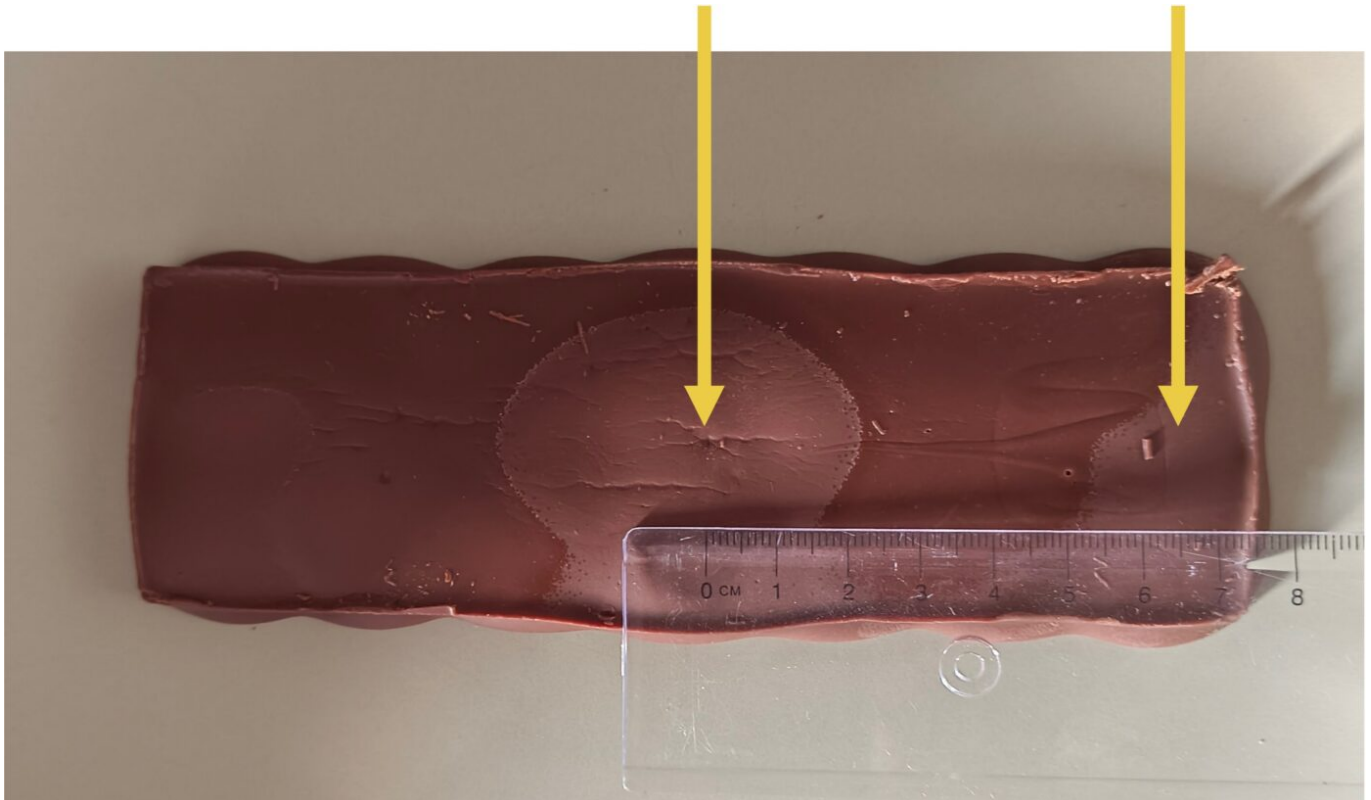
Meet zelf de lichtsnelheid

De gemiddelde mens zal geen interferometer tot zijn of haar beschikking hebben, maar ook met een magnetron en – jawel – een reep chocola kun je een behoorlijke meting van de

lichtsnelheid doen. De microgolven in de magnetron zijn namelijk net als licht [elektromagnetische golven](#), en planten zich dus ook voort met de lichtsnelheid. De frequentie van de microgolven staat vaak op een sticker op de magnetron of is te vinden in de handleiding. Kun je de frequentie niet vinden, dan is $f = 2{,}45 \cdot 10^9 \text{ Hz}$ een goede schatting.

De golflengte van de microgolven kun je bepalen met behulp van de chocola. Als je de magnetron aanzet, zal de chocola gaan smelten. Dit gebeurt niet overal even snel: de golven in de magnetron zijn zogeheten *staande* golven, die steeds op dezelfde plek hun pieken en dalen hebben. Op de plekken van die pieken en dalen (de *buiken* van de golf) zal de chocola snel smelten, terwijl er op de plekken daar precies tussenin (de *knopen* van de golf) weinig gebeurt. Dit is overigens precies de reden dat eten dat je opwarmt in de magnetron soms op sommige plekken al warm is en op andere plekken nog helemaal niet.

Om de golflengte van de microgolven te bepalen, leg je de chocola op een plat bord in de magnetron. Haal een eventuele roterende plaat uit de magnetron: het is belangrijk dat de chocoladereep niet beweegt. Zet de magnetron aan totdat je de chocola op enkele plekken ziet smelten. Afhankelijk van de magnetron en de chocola die je gebruikt kan de tijd variëren van enkele tientallen seconden tot meer dan een minuut, dus houd de reep in de gaten. Meet nu de afstand tussen twee opeenvolgende plekken waar de reep het meest gesmolten is. Dit is de halve golflengte: de afstand tussen twee buiken, een piek en een dal. Verdubbel dit getal om de golflengte λ te bepalen. Vermenigvuldig λ (uitgedrukt in meters) met de frequentie van je magnetron (in Hertz). Het resultaat zal een verrassend goede schatting van de lichtsnelheid zijn.



Chocola en de lichtsnelheid. De afstand tussen twee plekken waar de chocola het meest gesmolten is (bij de pijlen), is gelijk aan de helft van de golflengte van de microgolven.

Thuisexperimenten

De huis-tuin-en-keukenexperimenten die in dit artikel beschreven zijn, zijn uiteraard lang niet zo nauwkeurig als experimenten in een laboratorium met geavanceerde apparatuur. Toch zijn de thuisexperimenten in essentie niet heel anders dan hun laboratoriumtegenhangers. De kern van het tweespletenexperiment is een lichtstraal die op twee spleten valt, iets wat je zelf al kunt reproduceren met een laser en een stukje karton. Het meten van de lichtsnelheid komt in de basis neer op het bepalen van de frequentie en de golflengte van elektromagnetische golven – iets wat al aardig lukt met chocola in de magnetron. Zo blijkt maar dat natuurkunde niet beperkt is tot laboratoria: het is soms letterlijk binnen handbereik.