

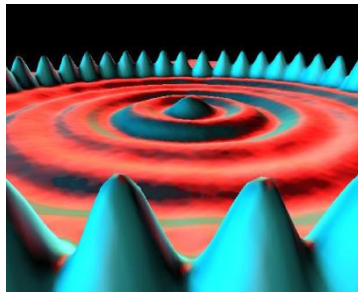


Brug tussen het onderzoek in modern fysica  
en het ondernemen in nanotechnologie

---

# Kwantumfysica

*De fysica van het kleine  
met de grote toepassingen*



Quantum Spin-Off is funded by the European Union under the LLP Comenius programme  
(540059-LLP-1-2013-1-BE-COMENIUS-CMP).

Renaat Frans, Laura Tamassia, Erica Andreotti

Contact: [renaat.frans@ucll.be](mailto:renaat.frans@ucll.be)



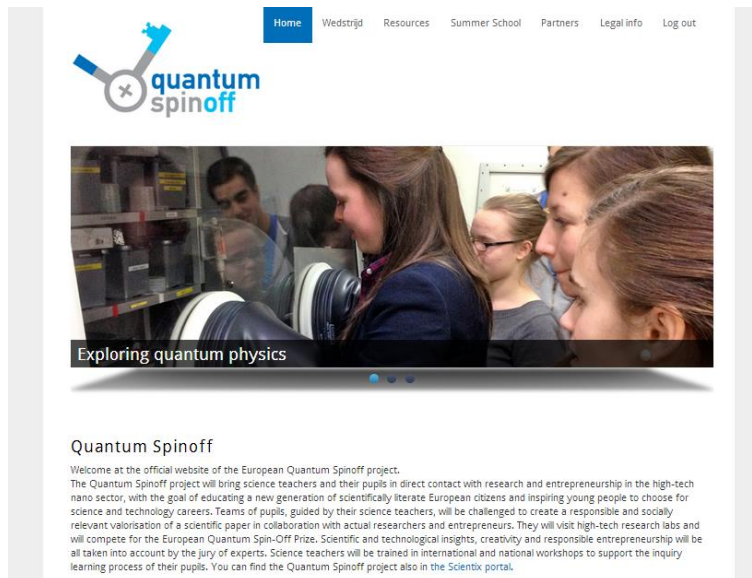
Lifelong  
Learning  
Programme

This material reflects the views only of the author, and the Commission cannot be held responsible for  
any use which may be made of the information contained therein.

*The Quantum Spin-Off project deals with the area of nanosciences.*

*The aim of each learning station is to give students (and their teachers) a first view into the concepts of modern quantum physics on an inquiry manner. Also the connection and growing societal relevance to numerous (nano)applications is shown.*

*These learning stations, films, ICT materials and teacher guidelines are available on [www.quantumspinoff.eu](http://www.quantumspinoff.eu)*



*The learning stations were developed within the EU Comenius project Quantum SpinOff.*

### **Project partners**

- (P1) Katholieke Hogeschool Limburg vzw - KHLIM
- (P2) Interuniversity Microelectronics Centre - IMEC
- (P3) University of Hasselt - IMO-IMOMEC
- (P4) Fachhochschule Nordwestschweiz - FHNW
- (P5) University of Basel - UNIBAS
- (P6) Ellinogermaniki Agogi - EA
- (P7) Ethniko Idryma Erevnon - NHRF
- (P8) University of Tartu - UT
- (P9) European Schoolnet
- (P10) Nanosurf AG

### **Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0)**

Under the following terms:

- Attribution — You must give [appropriate credit](#), provide a link to the license, and [indicate if changes were made](#). You may do so in any reasonable manner, but not in any way that suggests the licensor endorses you or your use.
- NonCommercial — You may not use the material for [commercial purposes](#).

You can:

- Share — copy and redistribute the material in any medium or format
  - Adapt — remix, transform, and build upon the material
- The licensor cannot revoke these freedoms as long as you follow the license terms.

You have to refer to this work as follows:

Frans R., Tamassia L., Andreotti E. (2015) Quantum SpinOff Learning Stations. Art of Teaching, UCLL, Diepenbeek, Belgium



Following learning materials can be used in addition to the learning stations:

### MOVIES

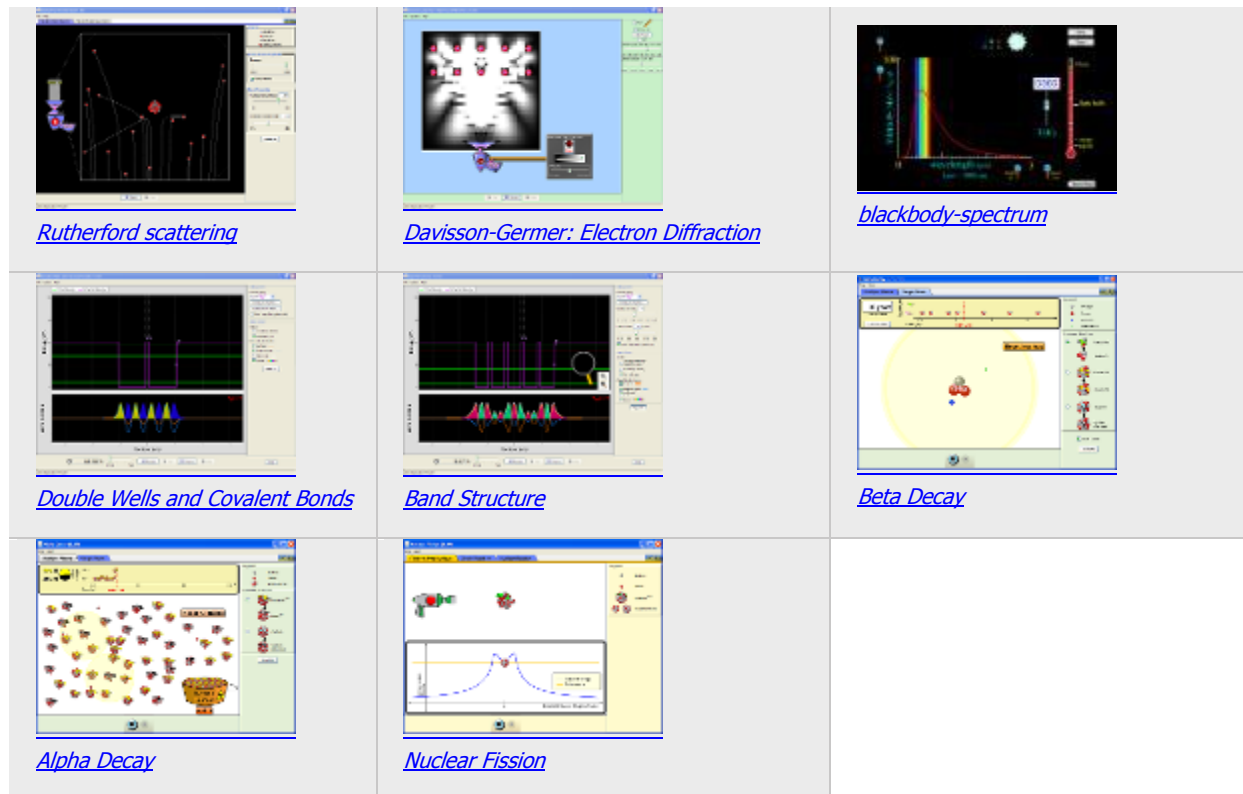
Following movies can be interesting to use in the classroom:

- Science movie: [Nanoyou](http://nanoyou.eu/) - An introduction to the strange new world of Nanoscience, narrated by Stephen Fry. (Source: <http://nanoyou.eu/>)
- Visit the cleanroom of Imec: <http://vimeo.com/80567552> (Source: IMEC)
- The hunt for Higgs: <http://www.youtube.com/watch?v=r4-wVzjnQRI> (Source: BBC)
- song: [particle of light](#) (Source: Carice van Houten)

### SIMULATIONS

Following simulations are a selection of the result of the PhET™ project at the University of Colorado with topics related to quantum physics and its technological applications.

		
<a href="#">Photoelektric effect</a>	<a href="#">Quantum Tunneling and Wave Packets</a>	<a href="#">Quantum Bound States</a>
		
<a href="#">Quantum Wave Interference</a>	<a href="#">Lasers</a>	<a href="#">Neon lights &amp; Other Discharge Lamps</a>
		
<a href="#">Fourier: Making waves</a>	<a href="#">Simplified MRI</a>	<a href="#">Models of the Hydrogen Atom</a>
		
<a href="#">Stern-Gerlach experiment</a>	<a href="#">Conductivity</a>	<a href="#">Semiconductors</a>



Source of picture on front page:

M.F. Crommie, C.P. Lutz, D.M. Eigler. **Confinement of electrons to quantum corrals on a metal surface.** Science 262, 218-220 (1993). Crommie, Lutz and Eigler were working at IBM Research Division, Almaden Research Center, San Jose, California, USA

## Inleiding tot deel 1: Waarom Kwantumfysica?

In deel 1 van deze leerstations verkennen we de vraag naar het ontstaan van kwantumfysica: zijn er fenomenen die de klassieke fysica niet kan verklaren? We onderzoeken stapsgewijze enkele van dergelijke fenomenen, kwalitatief en kwantitatief. In de leerstations zullen we daarom vaak concepten van de klassieke fysica naast concepten van de kwantumfysica plaatsen precies om te kunnen begrijpen hoe kwantumfysica bijdraagt tot het verstaan van het universum. Aan het eind van ieder leerstation vind je dan ook een korte synthese van de behandelde klassieke en kwantumconcepten, precies omdat deze twee types van concepten, ook de klassieke, erg nodig zijn om tot een dieper begrijpen van de wereld te komen.

Hieronder vind je een overzicht van de inhoud van elk leerstation. Zo zie je de opbouw en kan je een blik houden op de weg die we afleggen.

### **Learning station I:** Voor klassieke fysica onbegrijpelijke fenomenen?

Onze trip start met het dubbelspleetexperiment voor elektronen: hebben kleine 'deeltjes' een bepaalde baan zoals de klassieke fysica zegt? Kunnen we verklaren wat we waarnemen door elektronen op te vatten als kleine bolletjes? Kunnen we het twee-spletenexperiment met elektronen vergelijken met dat van zand of licht? Zegt dat ons iets over de aard van licht? Kunnen we de wereld opdelen in deeltjes en golven?

Daarna zullen we kijken naar de emissie- en absorptie lijnen van moleculen, een fenomeen waarvan we ons afvragen of het kan verklaard worden met het klassieke planetaire atoommodel van Rutherford of dat precies daaruit blijkt dat kwantumconcepten belangrijk zijn.

### **Learning station II:** Wat is licht?

We kijken nu naar het twee-spletenexperiment voor licht en stellen ons van daaruit vragen over de aard van licht. Begrijpen wat licht is, zal ons helpen om te begrijpen wat de fundamentele eigenschappen van 'deeltjes' in de natuur zijn en of dit dieper inzicht kan helpen om de fenomenen van leerstation 1 te duiden. De basisvraag is de volgende: Kunnen we licht begrijpen als een stroom deeltjes of als een golf? Om deze vraag te beantwoorden gaan we ook te rade bij de geschiedenis van de fysica en welke vragen de verschillende fysici zich daarover gesteld hebben.

### **Learning station III:** Wat trilt er bij licht?

Als licht te begrijpen valt al een golf, dan stelt zich de vraag 'wat trilt er?' Waaruit bestaan die lichtgolven dan? We zullen een vergelijking maken met mechanische golven zoals geluidsgolven. Maar het begrip 'veld' uit de klassieke fysica blijkt ons te helpen om te begrijpen wat licht is opgevat als een klassieke golf. Tenslotte zal dit idee van veld ook blijven in de kwantumtheorie van licht.

### **Learning station IV:** Deeltje-golf dualiteit

Tot hiertoe bestudeerden we de eigenschappen van licht als een klassieke golf, met de klassieke fysica dus. In dit leerstation zullen we de stap zetten naar de kwantumtheorie van licht. Wat zien we als we het dubbelspleetexperiment met licht uitvoeren en vooral: als we de intensiteit van het licht laten dalen? Gedraagt het licht zich dan nog als een golf? Of komen er deeltjes-eigenschappen naar boven? In dit leerstation berekenen we de energie van een kwantum van licht door te steunen op de Planck-Einstein relatie. Langs de andere kant berekenen we de golflengte van een lichtdeeltje (!) door de hypothese van De Broglie toe te passen. Op die manier ontdekken we dat dat de dualiteit golf-deeltje een fundamentele eigenschap van licht én van materie is!

**Learning station V:** De emissielijnen van waterstof voorspellen met een kwantum atoommodel

Op dit punt aangekomen van onze trip, hebben we de basiskennis verworven om terug enkele onverklaarbare fenomenen uit leerstation 1 te verklaren. We gaan terug naar de discrete emissielijnen van waterstof en gebruiken nu onze nieuwe inzichten om niet enkel het bestaan van zulke lijnen te verklaren maar ook om hun precieze frequenties te berekenen!

Je vindt de conceptuele structuur van elk leerstation schematisch terug op de website die bij deze leerstations hoort: [www.quantumspinoff.eu](http://www.quantumspinoff.eu)

We wensen je veel plezier op deze tour doorheen de fysica van het allerkleinste op grond waarvan elke dag nog grootste toepassingen worden bedacht.

**DEEL 1: CONCEPTEN VAN DE KWANTUMFYSICA****LEARNING STATION I: VOOR KLASSIEKE FYSICA ONBEGRIJPelijke FENOMENEN? 9**

<b>1</b>	<b>Het einde van de klassieke mechanica</b>	<b>9</b>
<b>2</b>	<b>Het verlies van het begrip baan: het dubbelspleet-experiment voor elektronen</b>	<b>10</b>
2.a	Dubbelspleetexperiment met zand	10
2.b	Door welke spleet gaat het elektron?	11
2.c	Het 2-spletenexperiment voor golven	12
2.d	Dubbelspleet experiment met grote moleculen	13
2.e	Dubbelspleetexperiment met licht	14
<b>3</b>	<b>Discrete emissie- en absorptiespectra van de elementen</b>	<b>16</b>
3.a	Kleuren typisch voor een chemisch element	16
3.b	Discrete emissielijnen uit atomen	17
3.c	Discrete Absorptielijnen	18
<b>4</b>	<b>Discrete spectraallijnen verklaren?</b>	<b>19</b>
4.a	Zijn versnellende elektronen in atomen de bronnen van licht?	19
4.b	De emissie van licht verklaard met het klassieke atoommodel?	20
4.c	Het Rutherford atoommodel stort in	21
<b>5</b>	<b>Concepten van leerstation I</b>	<b>23</b>

**LEARNING STATION II: WAT IS LICHT? 24**

<b>1</b>	<b>Bestaat licht uit een stroom deeltjes?</b>	<b>24</b>
1.a	Newtons deeltjestheorie voor licht	24
1.b	Foucaults experiment vergeleek de lichtsnelheid in lucht met die in water.	27
<b>2</b>	<b>Bestaat licht uit golven?</b>	<b>28</b>
2.a	De veronderstellingen van Christiaan Huygens	28
2.b	Hoe kan het dat lichtstralen elkaar kunnen kruisen?	28
2.c	Welke uitwijking ontstaat op de plaatsen waar afzonderlijke golven samenkomen?	29
2.d	Golffront, golflengte, periode	30
2.e	Snelheid van een golf	31
<b>3</b>	<b>Hoe Huygens eigenschappen van licht kon verklaren</b>	<b>31</b>
3.a	Het principe van Huygens	31
3.b	Weerkaatsing en breking verklaren met golftheorie	32
3.c	DiffRACTIE verklaren met golftheorie	33
<b>4</b>	<b>Het 2-spleten experiment voor licht</b>	<b>35</b>
4.a	Waarom ontstaan er maxima en minima in het 2-spleten experiment?	35
4.b	Verschillende weglengte, andere fase	36
<b>5</b>	<b>DiffRACTIE franjes bij ene één-spleetexperiment</b>	<b>37</b>
<b>6</b>	<b>Concepts in Learning Station II</b>	<b>38</b>

**LEARNING STATION III: WAT GOLFT ER BIJ LICHT? 39**

<b>1</b>	<b>Mechanische golven</b>	<b>39</b>
1.a	De bron van mechanische golven	39
1.b	Medium nodig?	39
1.c	Voortplanting en uitwijking in zelfde zin of andere zin?	40
1.d	Verplaatsen deeltjes zich met een golf mee?	41
1.e	De bron van lichtgolven	42
<b>2</b>	<b>Licht: wat golft er?</b>	<b>43</b>
2.a	Kracht(velden) die werken door het vacuüm	43
2.b	Velden die veranderen in de tijd: golven van een veld	45
2.c	Elektromagnetische golven	47
<b>3</b>	<b>Het elektromagnetisch spectrum</b>	<b>49</b>
<b>4</b>	<b>Het atoommodel van Rutherford zal inderdaad instorten</b>	<b>50</b>
<b>5</b>	<b>Concepten in Leerstation III</b>	<b>50</b>

## **LEARNING STATION IV: DEELTJE-GOLF DUALITEIT – KWANTA VAN VELDEN**

**52**

<b>1</b>	<b>Golf deeltje dualiteit: fundamentele eigenschap van licht en materie</b>	<b>52</b>
<b>2</b>	<b>Kwantumtheorie van licht en materie</b>	<b>54</b>
2.a	Elektromagnetische golven en energiekwanta: fotonen	54
2.b	Materiegolven en kwanta	55
<b>3</b>	<b>Kwantumvelden</b>	<b>56</b>
3.a	De golfintensiteit geeft de waarschijnlijkheid om kwanta te detecteren	56
3.b	Een deeltje als een golfpakket	58
3.c	De Heisenberg onbepaaldheidsrelatie	60
<b>4</b>	<b>Kwantumveldentheorie (Quantum Field Theory)</b>	<b>62</b>
<b>5</b>	<b>Concepten in Leerstation IV</b>	<b>63</b>

## **LEARNING STATION V: DE EMISSIELIJNEN VAN WATERSTOF VERKLAARD MET KWANTUMMECHANICA**

**65**

<b>1</b>	<b>Discrete emissiespectra van elementen verklaard?</b>	<b>65</b>
1.a	Emissielijnen van elementen: klassiek niet begrepen	65
1.b	Kwantumvelden van materie en licht	65
<b>2</b>	<b>De enigmatische formule van Balmer</b>	<b>66</b>
2.a	Opnieuw de gehele getallen van Pythagoras in de natuur	66
2.b	De formule van Balmer en het spectrum van waterstof	67
<b>3</b>	<b>Golven en gehele getallen: staande golven</b>	<b>68</b>
3.a	Gehele getallen in natuurtonen	68
3.b	Gehele getallen in de staande golven op een snaar	69
3.c	Gehele veelvouden in de frequenties van natuurtonen (Eigenfrequenties)	71
<b>4</b>	<b>Staande elektronengolven in het waterstofatoom</b>	<b>72</b>
4.a	Golven fitten	72

<b>5</b>	<b>Berekening met het Kwantum Atoommodel</b>	<b>75</b>
5.a	De afmeting van het waterstofatoom voorspellen	75
5.b	Emissielijnen van waterstof voorspellen	76
<b>6</b>	<b>Interpretatie van de formule van Balmer</b>	<b>79</b>
<b>7</b>	<b>3-dimensionale veralgemening: Orbitalen</b>	<b>81</b>
<b>8</b>	<b>Concepten in Leerstation V</b>	<b>82</b>
	<b>Bibliografie</b>	<b>83</b>

# Learning station I: Voor klassieke fysica onbegrijpelijke fenomenen?

## 1 Het einde van de klassieke mechanica

Het voorspellen van de baan gegeven de beginvoorwaarden, volgt uit de mechanica die Newton in 1687 in zijn 'Principia Mathematica Philosophae Naturalis' formuleerde

Als je tegen een bal trapt, verwacht je dat die een precieze baan zal volgen als gevolg van zijn beginpositie, zijn massa en de kracht die je erop uitoefent. Op grond van dezelfde fysica zijn we in staat om een raket te lanceren vanop de aarde naar de ruimte.



In de klassieke mechanica is het inderdaad zo dat als je van een massa de beginpositie, beginsnelheid en de kracht kent die erop werkt, dan kan je de baan van dat voorwerp voorspellen.

Dat je de baan kan voorspellen als je de beginvoorwaarden en de inwerkende kracht kent, is iets wat Newton ontdekte en neerschreef in zijn Principia Mathematica Philosophae Naturalis".

Tot het begin van de 20ste eeuw was de zogenaamde Klassieke Mechanica zonder twijfel de basis van alle fysica. Het was maar toen fysici de wereld op kleine schaal begonnen te verkennen dat het geleidelijk duidelijk werd dat het begrip baan, dat zo belangrijks was op een macroscopische schaal, in de microwereld zijn betekenis verloor. Baan bleek op microschaal nog slechts een benaderende betekenis te hebben en het fundamenteel inzicht won veld dat dingen eigenlijk helemaal geen vaste banen hebben.

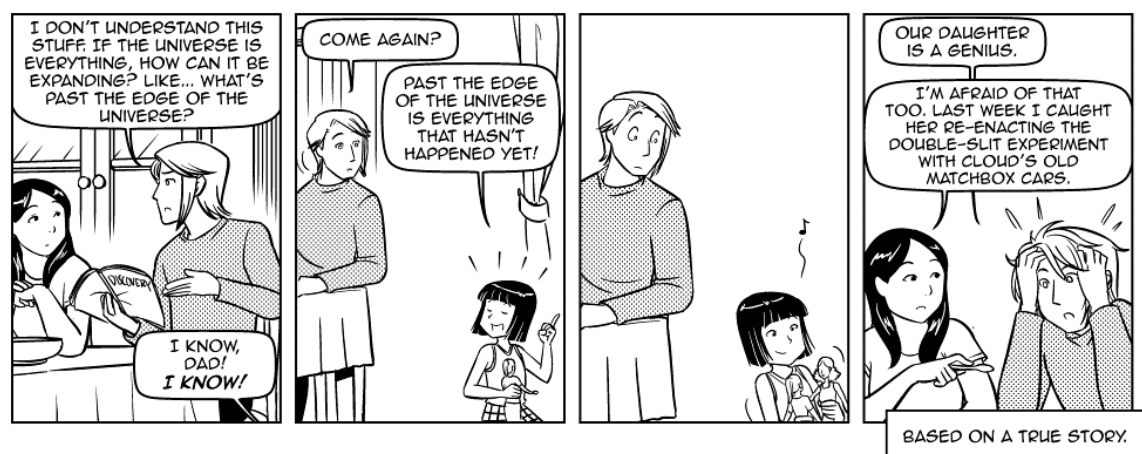


Figure 1 Matchbox Cars and Quantum Physics  
(Source: Sandra and Woo comic strip by Knörzer and Powree published under Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivs 3.0 License.).

Laten we trachten te begrijpen, zoals Sandra, wat era an de hand is. Het experiment om te ervaren wat er aan de hand is, is het beroemde dubbelspleetexperiment. De briljante Amerikaanse fysicus Richard Feynman zei dat in het dubbelspleetexperiment '... is in the

heart of quantum mechanics. In reality, it contains the only mystery.' Dus laten we daarnaar kijken.

### *Klassieke Mechanica*

*Geef me van een massa  
beginpositie, beginsnelheid, kracht*



*Je kan baan voorspellen van deeltje*

## 2 Het verlies van het begrip baan: het dubbelspleet-experiment voor elektronen

### 2.a Dubbelspleetexperiment met zand



Voor we kijken naar het dubbelspleetexperiment met elektronen, voeren we het experiment even uit met zand.

We hebben 2 spleten in een wand waardoor we zand naar beneden gieten.

Wat zal je zien op de wand daarbeneden?  
*Teken wat je verwacht te zien, hiernaast bij op de tekening!*

*Figure 2 Double slit experiment with sand  
(Adapted from Professor Jim Al-Khalili's lecture at the Royal Institution, see:  
<https://www.youtube.com/watch?v=A9tKncAdlHO>)*

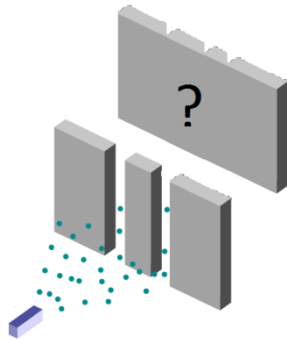
Volgde elk zandkorreltje een bepaald pad door één van de spleten?  
(JA/NEE)

Volgde elk zandkorreltje dus een baan?  
(JA/NEE)

Is het patroon dat beneden ontstaat het resultaat van alle individuele banen van elk zandkorreltje?  
(JA/NEE)

## 2.b Door welke spleet gaat het elektron?

Laten we nu met elektronen schieten.

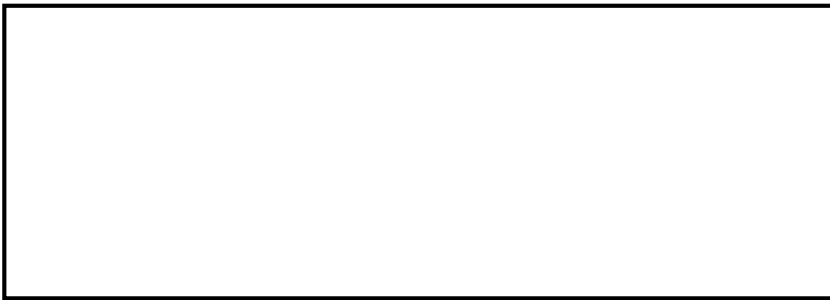


Als je elektronen schiet op een scherm met daarin 2 spleten (die heel kort bij elkaar staan), welk patroon verwacht je dan te zien op het scherm dat achter de spleten staat?

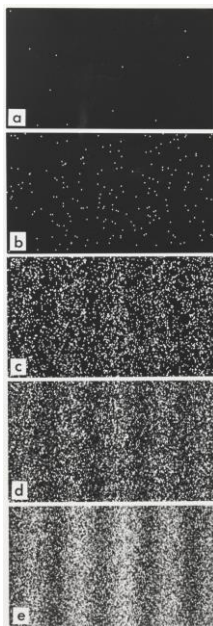
*Figuur 3 Schematische voorstelling van het 2-spletenexperiment met elektronen (Bron: Adapted van Wikipedia Public Domain)*

n

In de klassieke mechanica van Newton gedragen elektronen zich als kleine balletjes, deeltjes zoals kleine inktdruppeltjes van sprayverf. Als je sprayverf sproeit op een blad met twee spleten erin waarachter een tweede blad gehouden wordt als scherm, welk patroon ga je zien op het scherm? Maak hieronder een tekening van het patroon dat je verwacht te zien op het scherm.



*Het klassieke verwachtingspatroon voor het 2-spletenexperiment met elektronen*



De foto's hiernaast geven het resultaat weer van een dubbelspleet experiment met elektronen (uitgevoerd door Hitachi Labs). In dit experiment is men er zelfs in geslaagd om een elektron één na één "af te vuren". Bekijk ook het filmpje op [www.youtube.com/watch?v=oxknfn97vFE](http://www.youtube.com/watch?v=oxknfn97vFE)

Kijk naar het patroon dat de elektronen opbouwen en vergelijk dat met de spray verf of de zandkorrels hierboven. Is dit nog altijd hetzelfde patroon? (JA/NEE)

Je ziet nu dat er een breed patroon ontstaat met verschillende plaatsen waar de elektronen vaker toekomen dan op andere.

Kan je nog volhouden dat een elektron ofwel door de ene spleet, ofwel door de andere gaat? (JA/NEE)

Kan je dan nog spreken van een baan van het elektron als je niet kan zeggen dat het elektron door de ene ofwel door de andere spleet is gegaan? (JA/NEE)

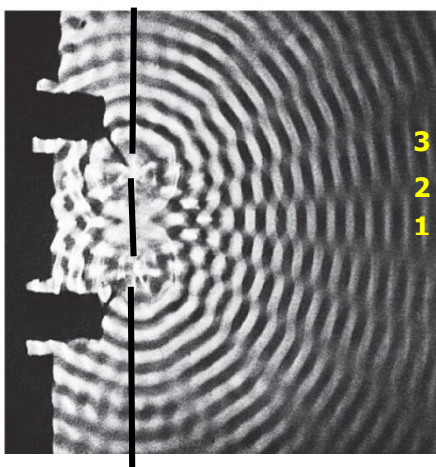
*Figuur 4 Build-up of an interference pattern. The number of detected electrons is 100 (b), 3000 (c), 20000 (d), 70000 (e). (Bron: Tonomura, A., Endo, J., Matsuda, T., and Kawasaki, T. (1989) Demonstration of single-electron buildup of an interference pattern, American Journal of Physics 57 (2), 117–120)*

Het begrip precieze baan en positie (locatie) blijkt inderdaad verloren te gaan in de kwantummechanica of moet minstens toch herbekeken te worden. De klassieke mechanica die banen en posities als fundamenteel beschouwt, schiet dus te kort om de natuur te verklaren. Zie ook de animatiefilm van dr. Quantum<sup>1</sup>:

[www.youtube.com/watch?v=DfPeprQ7oGc](http://www.youtube.com/watch?v=DfPeprQ7oGc)

De elektronen komen dus één na één toe, maar je kan niet zeggen door welke spleet ze zijn gegaan. Op die manier spreekt het experiment de klassieke mechanica tegen. Merk dat de elektronen wel een bepaald **patroon** toekomen. Op bepaalde plaatsen komen meer elektronen toe dan op andere. Dit patroon kennen we eigenlijk van een 2-spleten experiment niet met deeltjes maar wel met golven! Zijn elektronen dan geen deeltjes meer in de kwantummechanica?

## 2.c Het 2-spletenexperiment voor golven



Kijken we inderdaad naar een 2-spleten experiment voor watergolven uit de klassieke fysica (zie foto). Golftoppen zijn helder weergegeven, golfdalen zijn donker. Vlakke gebieden zijn grijs. Zie je welk speciaal patroon de golven vormen na de spleten?

Figuur 5 *Interferentie van watergolven* (Bron: PSSC Physics Haber-Schaim, Dodge, Gardner, Shore. Kendall/Hunt, 1991.)

Zijn er plaatsen waar er helemaal geen golven zijn? (JA/NEE)

Waar vind je golftoppen en –dalen? Noteer de overeenkomstige nummer van het aangeduide gebied: .....

Waar vind je vlakke gebieden? .....

Achter de spleten ontstaan nu gebieden met golfbergen en dalen (maxima) waartussen gebieden liggen die grijs zijn d.w.z. vlak (minima).

De kwantummechanica zal inderdaad aan elk deeltje ook een golfkarakter toekennen. Wat dit precies te betekenen heeft, onderzoeken we precies in deze leerstations.

Het patroon van franjes met op sommige plaatsen golven en op andere geen golfvorming, noemt men een **interferentiepatroon**. Het ontstaan van zulk een interferentiepatroon is een typisch gevolg van het golfkarakter van het fenomeen. Op plaatsen waar golfbergen of golfdalen ontmoeten, versterken deze elkaar en dit telt op tot plaatsen met hoge golven (maxima). Waar golfdalen ontmoeten, heffen beide

<sup>1</sup> In het filmpje van dr. Quantum wordt het beeld gegeven van het elektron dat voor de spleten "gesplitst" wordt in twee: dit is zeker niet de interpretatie van de kwantummechanica! Het is niet zozeer de materie die uitgesmeerd wordt over de twee spleten dan wel de golven van de elektronen die wel door de beide spleten kunnen gaan en die met zichzelf interfereren. We komen daarop terug.

elkaar op en op die plaatsen zijn er dan geen golven (minima). We komen daarop terug in leerstation II " Wat is licht?"

Laten we nu terugkeren naar de resultaten van het tweespletenexperiment voor elektronen en dit vergelijken met de uitkomsten van dit interferentie-experiment met golven.

Zie je ook zo een patroon met franjes in het tweespletenexperiment met elektronen? (JA/NEE)

Kan je dus besluiten dat elektronen ook een golfachtig karakter hebben? (JA/NEE)

**Een elektron komt deeltje per deeltje toe, maar het patroon dat gevormd wordt door deze deeltjes is een interferentiepatroon, veroorzaakt door de golf eigenschappen van elektronen!**

## 2.d Dubbelspleet experiment met grote moleculen

Elektronen zijn natuurlijk uiterst kleine deeltjes en je zou kunnen denken dat het deeltje-golf karakter zich tot elektronen beperkt.

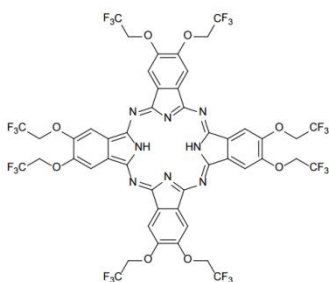
Denk jij dat het gedrag van het elektron uitzonderlijk is in de materie, of gaan ook grotere moleculen een gelijkaardig interferentiepatroon produceren in het dubbelspleet experiment?

.....

Het dubbelspleet experiment is recent ook uitgevoerd met de grote **fullereen moleculen**, C60, ook **ucky balls** genoemd in het Engels. Deze moleculen zijn gemaakt uit 60 carbonatomen die volgens de geometrie van een voetbalbal aan elkaar zijn gebonden. Een moleculaire voetbal als het ware. Het fullereen molecuul is eigenlijk de kleinste voetbalbal van de wereld.

Het resultaat van het experiment kan je zien in de figuur. Ook hier komen de moleculen toe in een verband met minima en maxima.

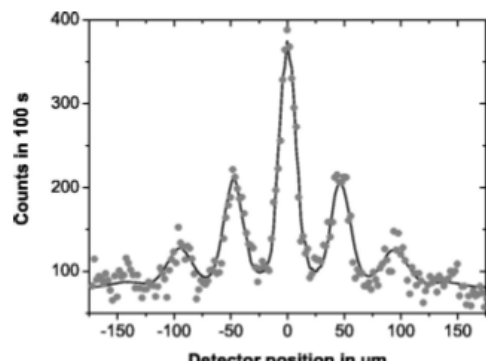
Hoe groter 'voorwerpen' worden, hoe kleiner het golfkarakter, de golflengte wordt (we komen daarop terug in leerstation IV). Daarom worden interferentie-experimenten met grotere 'dingen' steeds moeilijker: je hebt steeds kleinere spleten nodig, die steeds korter op elkaar staan om een interferentiepatroon te kunnen waarnemen.



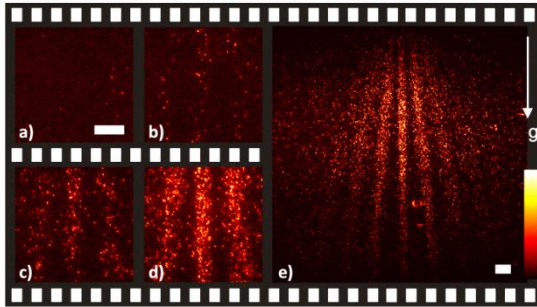
Recent is er een 2-spletenexperiment uitgevoerd met een heel groot molecule. Het gaat om grote kleurstofmoleculen met massa's meer dan 500 keer groter dan de massa van een koolstofatoom. Ook deze grote massieve molecule hebben nog een golfkarakter. Als je voldoende kleine spleten hebt, kan je zien dat ze één na één zo een interferentiepatroon kunnen opbouwen.



*Figuur 6 Het fullereen C<sub>60</sub> molecule is de kleinste voetbalbal ter wereld (uit: O. Nairz, M. Arndt en A. Zeilinger, "Quantum interference experiments with large molecules")*



*Figuur 7 Fullereen interferentiepatroon (uit: O. Nairz, M. Arndt en A. Zeilinger, "Quantum interference experiments with large molecules")*



Zulk onderzoek op de grens van de klassieke en de kwantummechanica, toont dat golf-deeltje dualiteit een fundamentele eigenschap is in de natuur

Bekijk deze korte Quantum Molecular Movie [www.nature.com/nnano/journal/v7/n5/extref/nnano.2012.34-s3.avi](http://www.nature.com/nnano/journal/v7/n5/extref/nnano.2012.34-s3.avi)

Figure 8 Een kwantum interferentiepatroon opgebouwd door grote kleurstofmoleculen, enkele beelden uit de 'Quantum Molecular Movie'. (Juffmann, T., Milic, A., Müllneritsch, M., Asenbaum, P., Tsukernik, A., Tüxen, J., ... & Arndt, M. (2012). Real-time single-molecule imaging of quantum interference. *Nature nanotechnology*, 7(5), 297-300)

Bij het ontstaan van de eerste ideeën rond de kwantummechanica in de vroege 20ste eeuw, leken deze golf-deeltje eigenschappen heel vreemd en theoretisch. Maar deze vreemde 'theorie' wordt experimenteel steeds toegankelijker. In experimenten met grote moleculen die bestaan uit duizenden protonen, neutronen en elektronen wordt het golfkarakter van deeltjes waargenomen. Wanneer zal men voor het eerst een 2-spletenexperiment met een virus kunnen uitvoeren?

De apparaten die voor deze experimenten ontwikkeld worden, kan men ook goed gebruiken in nieuwe nanotechnologische toepassingen waardoor op termijn quantum computing of nano-medische toepassingen gemeen goed kunnen worden. Op die manier draagt fundamenteel onderzoek, gedreven door menselijke nieuwsgierigheid, bij tot nieuwe mogelijkheden voor de mensheid.

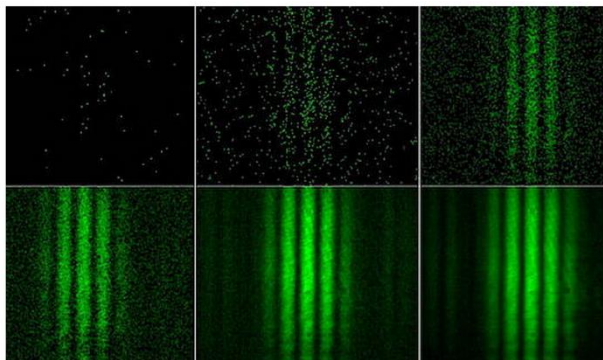
Maar goed, wat kunnen we nu besluiten: Is het elektron 'speciaal' of Is de golf-deeltje dualiteit een fundamentele eigenschap van alle materie?

## 2.e Dubbelspleetexperiment met licht



Wanneer we nu het dubbelspleetexperiment uitvoeren met licht, lijkt er op het eerste zicht niet veel speciaals te gebeuren: we zien een interferentiepatroon met franjes van licht en geen licht op het scherm.

Dit is toch normaal want was licht geen golf? (We gaan nog dieper in op deze vraag in leerstation II 'Wat is licht?')



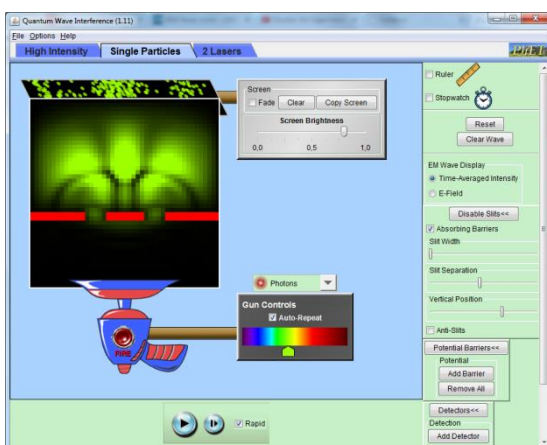
Maar als we de lichtintensiteit drastisch naar beneden brengen, zien we dat het licht – waarvan we dachten dat het een golf was – toekomt deeltje per deeltje. Deze lichtdeeltjes worden fotonen genoemd.

Figure 9 Licht komt foton per foton toe: het bekende diffractie patroon wordt opgebouwd foton per foton. Dit patroon werd opgenomen door dit patroon werd opgenomen een 'single photon CCD-camera' (Recording by A. Weis, University of Fribourg)

Dus er is iets mis met de manier waarop de klassieke mechanica de wereld ziet: kleine 'dingen' zoals elektronen of molecules, die we voorheen als 'balletjes' beschouwden, kunnen een interferentiepatroon opbouwen zoals we dat van golven verwachten. Licht, waarvan we dachten dat louter uit golven bestond, kan toch deeltje per deeltje toekomen.

Deze **golf-deeltje dualiteit** is één van de nieuwe sleutelconcepten waarmee we vandaag de natuur verstaan, het is een nieuw inzicht van de kwantummechanica en laat zien dat de klassieke mechanica niet voldoende is om de wereld te begrijpen. In kwantummechanica zal het 'normaal' zijn dat er een onbepaaldheid komt op een baan van een deeltje. We komen hierop terug in leerstation IV 'golf-deeltje dualiteit'.

### Oefening met een applet:



Je kan nu even spelen met de simulatie van het 2-spletenexperiment van Phet "Kwantumgolf interferentie"

Bron: University of Colorado, Boulder  
[phet.colorado.edu/en/simulation/quantum-wave-interference](http://phet.colorado.edu/en/simulation/quantum-wave-interference)

Probeer de instellingen in orde te krijgen voor het 2-spletenexperiment voor fotonen. Je krijgt de beste resultaten als je de fotonen afschiet 'met herhaling'. Het kan zijn dat je de afstand tussen de spleten en de spleetbreedte moet aanpassen om een duidelijk interferentiepatroon te kunnen waarnemen.

Beantwoord nu volgende conceptuele vragen:

1. Als je het resultaat bekijkt van het 2-spletenexperiment voor licht met hoge intensiteit, kan je het waargenomen patroon verklaren door licht als klassieke golven op te vatten? (JA/NEE) want.....
2. Als je het resultaat bekijkt voor het experiment uitgevoerd met een enkel foton, kan je de waarneming dan verklaren door licht als een klassieke golf op te vatten? Heb je nu kwantumtheorie nodig? (JA/NEE) want.....

Schakel nu over naar het 2-spletenexperiment voor elektronen:

1. Bekijk het resultaat van een elektronenbundel van hoge intensiteit, kan je het waargenomen patroon verklaren met klassieke golventheorie? (JA/NEE) want.....
2. Bekijk het resultaat van het experiment uitgevoerd met één enkel elektron, kan je het waargenomen resultaat verklaren met de klassieke mechanica of heb je kwantumtheorie nodig? (JA/NEE) want.....

### 3 Discrete emissie- en absorptiespectra van de elementen

De golf-deeltje dualiteit en het verlies van de precieze bepaaldheid van een baan voor kleine 'dingetjes' zijn nieuwe sleutelconcepten van de kwantummechanica, onbekend in de klassieke mechanica. Laten we kijken hoe deze nieuwe mechanica inderdaad in staat is om klaarblijkelijke eigenschappen van moleculen te verklaren, wat met de klassieke mechanica niet mogelijk was.

#### 3.a Kleuren typisch voor een chemisch element



Eind 19<sup>de</sup> eeuw was al bekend dat stoffen bij verhitting  **karakteristieke kleurspectra**  uitzenden. Als je een stof in een vlam werpt, dan krijg je een kleur die karakteristiek is voor die stof. Op die manier kan men nagaan met welke stof men te doen heeft.

*Figuur 10 Natrium of koper in een vlam werpen, geeft de karakteristieke gele kleur voor Na of blauw voor Cu.*

**Experiment: Voer zelf enkele vlamproeven uit.**

How to Conduct a Flame Test  
with Dr. Anne Marie Helmenstine



In de video "How to conduct a flame test" wordt de proef uitgelegd:  
[video.about.com/chemistry/How-to-Do-a-Flame-Test.htm](https://www.youtube.com/watch?v=7D811111111)

Vraag eventueel raad aan je leraar chemie. Voer ze uit en **vraag je af hoe het kan dat elke stof zo een karakteristieke kleur heeft.** Noteer de kleur van de vlam en de stof.

Stof	Kleur vlam

#### Experiment met gasontladinglampen

De typische kleuren die een stof kan uitzenden, zijn nog beter waar te nemen in **gasdrukampen**. Dit zijn lampen waarin zich een specifiek gas bevindt. Als je spanning op de lamp zet, licht het gas op in de kleur die typisch is voor de stof die zich in de lamp bevindt.



*Natriumlampen* zie je vaak langs autosnelwegen, ze geven het typische licht van Na.

*Kwikdampampen* zie je bijvoorbeeld in de koplampen van een auto, ze geven het typische wit-blauwe licht.

*Je kan de emissielijnen bekijken met een spectrometer. Misschien heb je in je lab een spectrometer of kan je een pocket versie zelf maken. Zie voor instructies daarvoor in Leerstation XI.*

### 3.b Discrete emissielijnen uit atomen

Je hebt dus de karakteristieke spectraalkleuren van stoffen kunnen waarnemen. Natrium in een vlam of in een gasdruk lamp geeft steeds precies dezelfde herkenbare gele kleur. Door verhitting in de vlam of in een gasdruk lamp krijgen we de elementen in **atomaire** toestand.

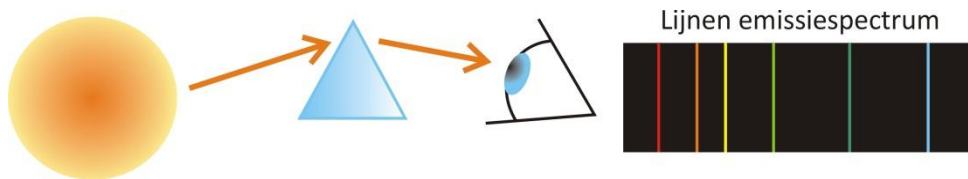
Het zijn dus de atomen zelf  
die de karakteristieke kleuren uitzenden.

De vraag die fysici einde 19<sup>de</sup> en begin 20<sup>ste</sup> eeuw dienden te beantwoorden was:

Hoe kan een atoom zo precieze kleuren uitzenden?

Fysici hadden niet verwacht dat de zoektocht naar het antwoord op deze vraag tot een nieuwe fysica zou leiden: *de kwantumfysica*. In deze leerstations zullen we deze zoektocht samen terug beleven. Onze zoektocht start bij de karakteristieke kleuren van de emissiespectra. Wanneer je een stof opwarmt of er een spanning opzet, zie je een karakteristieke kleur die eigenlijk een superpositie is van een **afzonderlijk aantal precieze kleurlijnen**.

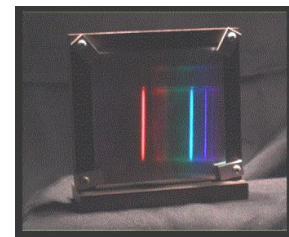
Met een prisma of een rooster, kunnen we het licht splitsen en zien we uit welke afzonderlijke kleurlijnen het licht uitgezonden door deze stof is opgebouwd. Een rooster is een dia met zeer fijne (verticale) lijntjes op.



*Figuur 11 Een atomaire gas straalt licht uit dat je met een prisma of rooster splitst naargelang de golflengte. Je ziet dat de typische kleur van het gas is opgebouwd uit een **discreet aantal** precieze kleurenlijnen. Deze discrete emissielijnen zijn kenmerkend voor het element aanwezig in de lamp*

Laten we bijvoorbeeld kijken naar het emissiespectrum van waterstof, het eerste element in de tabel van de elementen, het meest eenvoudige element en tegelijk de meest voorkomende stof in het universum..

In leerstation V, zal je, zoals Louis De Broglie, in staat zijn om, de *golflengtes van de uitgezonden lijnen te voorspellen* op basis van de kwantumfysica, en dit tot op 4 cijfers nauwkeurig!

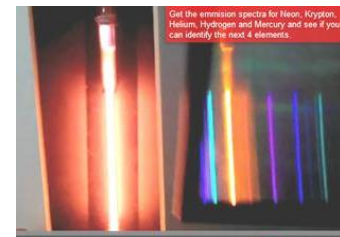


*Figuur 12 Het karakteristieke lijnenspectrum van atomaire **waterstof** bestaat uit 3 heldere lijnen: een rode, een blauwe en een violette lijn.*

#### i) **Experiment: Het element bepalen in 4 gasdruk lampen**

In volgend filmpje zie je hoe het licht uitgezonden door gasdruk lampen gevuld met 4 verschillende elementen, splitst in kleurlijnen. In plaats van een prisma, stuurt men het licht door een rooster (in het Engels 'diffraction grating' genoemd).

Zoek nu de emissiespectra op van Neon, Krypton, Helium, Waterstof en Kwik (in het Engels Mercury). Vergelijk deze emissiespectra met de spectra van de



*Figuur 13 Atomic Spectra - Name that element*  
[www.youtube.com/watch?v=1qT7h1YvKq0&feature=related](http://www.youtube.com/watch?v=1qT7h1YvKq0&feature=related)

verschillende lampen. Bepaal dan welke stof elke lamp bevat.

Lamp	Welk element is er in de lamp?
1	
2	
3	
4	

ii) **Analyse van het licht dat uitgezonden wordt door sterren**

In metingen van de spectra van zon of andere **sterren**, herkent men de karakteristieke lijnen van voornamelijk H en He. Hieruit leert dat die sterren voornamelijk uit waterstof en helium bestaan. Een verdere studie van deze spectra geeft ook informatie over de leeftijd en zelfs de beweging van sterren.



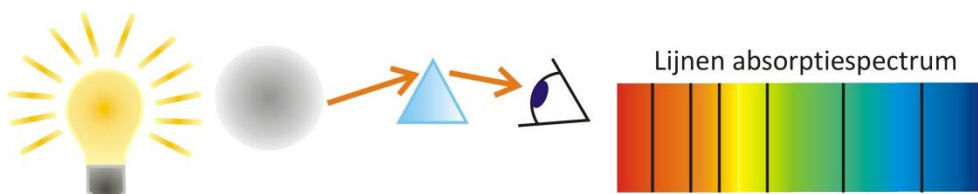
Bekijk het filmpje 'The Spectrum of Stars' op [www.youtube.com/watch?v=l4yg4HTm3uk](http://www.youtube.com/watch?v=l4yg4HTm3uk) (Opm: 'sodium' is Engels voor 'natrium')

Atomen kunnen dus welbepaalde discrete emissielijnen uitzenden, die ons zelfs toelaten de handtekeningen van chemische elementen te zien in sterren die lichtjaren van ons afstaan. Maar ook het omgekeerde is mogelijk: licht kan door atomaire wolken geabsorbeerd worden. Ook deze absorptie gebeurt in discrete lijnen, net voor bepaalde kleuren.

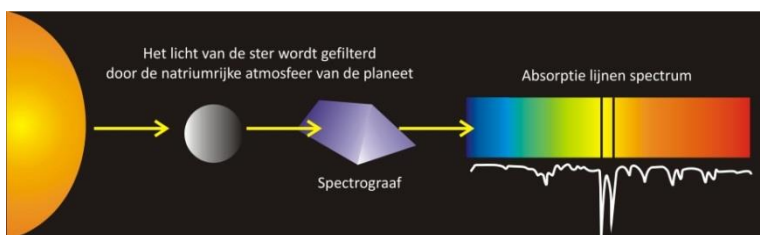
3.c **Discrete Absorptielijnen**

Als ster- of zonlicht op haar weg naar de waarnemer een koude gaswolk passeert, kunnen specifieke kleuren van het uitgezonden licht geabsorbeerd worden. Daardoor ontstaan zwarte, geabsorbeerde lijnen in het spectrum. Die lijnen noemt men absorptielijnen. Het bijhorende spectrum noemt men een absorptiespectrum.

Een studie van het absorptiespectrum verradt de aanwezigheid van welbepaalde chemische elementen in het gas waar het licht is doorgedaan.



*Figuur 14 Gaat 'wit' licht door een atomair gas, dan blijken welbepaalde precieze kleuren, lijnen tegengehouden te worden. De atomen in het gas absorberen deze frequenties die dan verdwijnen uit het licht: er ontstaat opnieuw een **discreet** absorptiespectrum.*



Men bepaalt de chemische elementen in een atmosfeer van een planeet door het absorptiespectrum te meten van zonlicht dat door de atmosfeer van de planeet gegaan is.

De absorptie van licht in welbepaalde lijnen treedt dus op als het licht door een specifiek element wordt geabsorbeerd:

De emissiespectra en absorptiespectra vormen de handtekening van de atoom- of molecuulsoort.

## 4 Discrete spectraallijnen verklaren?

### 4.a Zijn versnellende elektronen in atomen de bronnen van licht?

Ok, atomen zenden discrete emissielijnen uit, maar de vraag blijft:

Hoe kan een atoom zo precieze kleuren uitzenden en absorberen?

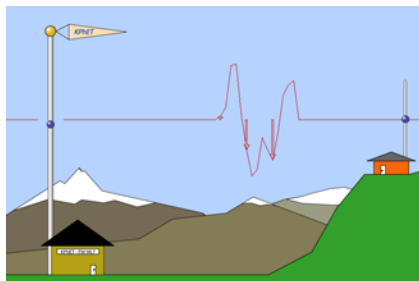
Het antwoord moeten we in de eerste plaats gaan zoeken in het atoom zelf.

Hoe zou een atoom licht kunnen **uitzenden**?

Hoe zou een atoom licht kunnen **absorberen**?

#### De analogie met een zendantenne:

We weten natuurlijk al sinds de 19<sup>de</sup> eeuw dat licht een elektromagnetische golf is. Om te begrijpen hoe een atoom licht kan uitzenden, kijken we daarom hoe een antenne elektromagnetische golven uitzendt.



Ga na hoe een antenne een elektromagnetische golf kan uitzenden:

[phet.colorado.edu/en/simulation/radio-waves](http://phet.colorado.edu/en/simulation/radio-waves)

Let op de lading. Wat moet de lading doen opdat er een radiogolf ontstaat?

.....

*Figure 15 In een antenne worden ladingen versneld. Hierdoor verandert het elektrisch veld waardoor een elektromagnetische golf ontstaat. (PHet applet, University of Colorado, Boulder)*

Het is een bewegende, eigenlijk versnellende lading in een antenne die een elektromagnetische golf doet ontstaan!

Zijn er in een atoom zijn ook versnellende ladingen te vinden? .....

Inderdaad: hun versnellingen veroorzaken de emissie van elektromagnetische straling. Door hun beweging zijn de elektronen atomaire zendantennes die een trillend elektromagnetisch veld kunnen uitzenden, licht dus. Net zoals een antenne waarin je ladingen laat 'rondzwieren'.

Dus de klassieke theorie van elektromagnetisme verklaart het uitzenden van elektromagnetische golven door de snelle versnellingen van ladingen (elektronen dus) die in het atoom optreden.

## 4.b De emissie van licht verklaard met het klassieke atoommodel?

**Kan het klassieke atoommodel verklaren waarom atomen zo precieze discrete lijnen kunnen uitzenden of absorberen?**

**Hoe kan de beweging van elektronen zo geordend zijn dat precieze kleurlijnen met bepaalde frequenties worden uitgezonden?**

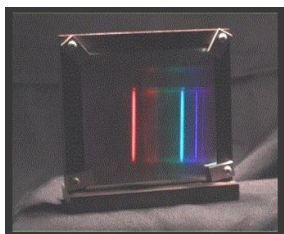
Om dit te onderzoeken, moeten we het klassieke atoommodel van Rutherford van naderbij bekijken. Het atoommodel van Rutherford was het laatste klassieke atoommodel voor de komst van de kwantummechanica...

**i) Schets het klassieke 'planetaire' atoommodel van Rutherford:**

**ii) Zoek op in welke tijd Rutherford in Cambridge werkte: .....**

Het Rutherford atoommodel wordt ook wel eens het 'planetaire' atoommodel genoemd omdat de elektronen lijken zoals planeten rond de kern te draaien.

Stel nu dat het atoom rood licht gaat uitzenden. Rood licht heeft een (LAGERE/HOGERE) frequentie dan blauw licht. Bijgevolg zou het elektron, om rood licht te kunnen uitzenden, trager moeten draaien dan wanneer het blauw licht zou uitzenden.



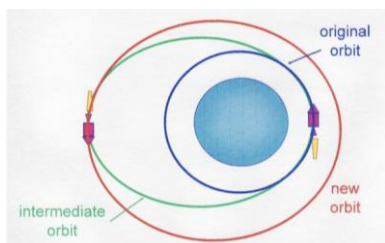
Nu het waterstofatoom heeft 3 sterke lijnen: een rode, een blauwe (turquoise) en een violette.

Zou het dan kunnen dat er dat het elektron van het waterstofatoom in 3 overeenkomende banen kan zijn: een wat 'tragere' baan voor het rode, een wat snellere voor het blauwe en een snelle voor het violette.

Zou het mogelijk zijn dat er 3 banen kunnen zijn met verschillende snelheden? Wat is je hypothese? (JA/NEE)

En zou het elektron dan werkelijk in deze banen kunnen gaan draaien?

**Laten we het vergelijken met de banen van satellieten:**



Een satelliet die rond de aarde of de zon draait, kan naar een hoger of lagere baan worden gebracht. Dus misschien gebeurt er iets gelijkaardigs met de baan van het elektron rond de kern van het atoom. Zou het kunnen dat het naar een hogere en dan weer naar een lagere baan gaat zodat het de 'gewenste' kleur gaat uitzenden?

Ok, misschien is dit een eerste aanzet tot een antwoord, maar de vraag blijft:

**Waarom zouden enkel bepaalde banen toegelaten zijn,  
nl. die overeenkomen met de 'gewenste' kleuren?**

In het klassieke beeld van een satelliet die ronddraait, zijn alle mogelijke banen mogelijk: lage zowel als hoge en alles tussenin. Als hetzelfde geldt voor de mogelijke banen van het elektron rond het atoom, en elke baan overeenkomt met een kleur, zou het waterstofatoom zowat alle kleuren moeten uitzenden.

Zendt het waterstofatoom alle mogelijke kleuren uit?  
(JA/NEE)

Maar er blijkt nog een groter probleem te zijn met het klassieke atoommodel...

**4.c Het Rutherford atoommodel stort in**

Erger nog een ronddraaiend elektron zal, zoals een antenne waarin een stroom rondloopt, de hele tijd elektromagnetische golven uitzenden.

Maar aan een zendantenne voer je continu energie toe opdat ze zou kunnen blijven zenden, maar niemand voert energie toe aan het atoom!



Figuur 16

*Een rondlopende stroom in een antenne zendt elektromagnetische golven uit. Maar een draaiend elektron veroorzaakt dus een stroom op atomaire schaal. Bijgevolg moet het atoom daarom elektromagnetische golven uitzenden.  
Maar energie uitzenden gaat ten koste van de eigen energie: Niels Bohr zag in dat het elektron continu energie moest verliezen en bijgevolg binnen de kortste keren op de kern zou vallen. Dus atomen zouden niet kunnen bestaan volgens de klassieke fysica!  
(Bron figuur: EDN, maart 2000)*

Waar moet dan de energie vandaan komen die een ronddraaiend elektron uitzendt (in de vorm van elektromagnetische golven)?

.....

Als het elektron dus voortdurend energie verliest, wat zal er dan gebeuren?

.....

De emissie van elektromagnetische golven kan dus enkel gebeuren ten koste van de eigen bewegingsenergie van de rondcirkelende elektronen. Dit betekent dat de rondcirkelende elektronen voortdurend energie verliezen aan het elektromagnetisch veld dat ze uitzenden.

Het was de Deense fysicus Niels Bohr die beseftte dat door het uitzenden van 'licht' de elektronen voortdurend energie en baansnelheid zouden moeten verliezen, waardoor ze binnen de kortste keren op de atoomkern zouden neerstorten. M.a.w. Niels Bohr zag in dat het atoom met zijn wentelende elektronen natuurkundig helemaal niet kan bestaan. Welnu, we bestaan toch allemaal, hoe kan dit dan?

**Volgens de klassieke fysica  
kan het 'planetaire' atoommodel van Rutherford en dus geen materie bestaan.**

**De klassieke fysica kan het optreden van  
emissie- en absorptielijnen in chemische elementen niet verklaren.**

In 2013 was het precies 100 jaar geleden dat Bohr het eerste kwantumatoommodel voorstelde..

In de volgende leerstations nemen we je mee op deze menselijke zoektocht naar het begrijpen van de emissie van licht door materie. Kwantumfysica heeft bijgedragen tot het begrijpen daarvan. Inderdaad fenomenen van licht uit materie kunnen niet begrepen met klassieke fysica: bewegingen van elektronen in de materie zijn niet te beschouwen zoals draaiende 'balletjes' zoals de klassieke mechanica dat doet. Het uitzenden of absorberen van licht is ook niet louter te begrijpen als klassieke golven van het elektromagnetisme.



Het zijn mensen zoals Max Planck, Albert Einstein, Niels Bohr, Louis De Broglie, Werner Heisenberg en Erwin Schrödinger die geworsteld hebben met de nieuwe ideeën van de kwantumfysica.

In leerstation V zul je in staat zijn om zoals Bohr en De Broglie om de golflengtes van de uitgezonden lijnen van waterstof tot op 4 cijfers kwantitatief te voorspellen!

*Figuur 17 Heisenberg en Bohr in Kopenhagen in 1934  
(Bron foto: AIP, American Institute for Physics, foto genomen door Paul Ehrenfest).*

We beginnen de zoektocht in het volgende hoofdstuk met de vraag naar **wat licht is**.

## 5 Concepten van leerstation I

### Klassieke concepten

1. Gegeven de beginpositie en beginsnelheid van een massa en de netto-kracht die erop werkt, is het mogelijk om.....
2. Interferentiepatroon van klassieke golven (v.b. 2-spleten experiment voor watergolven).
3. Een lading zoals het elektron, dat versnelt (bv. door rond te draaien) wekt een ..... veld op.  
Dat is het geval voor elektronen in het atoom: ze kunnen licht uitzenden omdat ze versnelde geladen deeltjes zijn.
4. Atoommodel van Rutherford.

### Kwantumconcepten

1. De baan van deeltjes is niet precies bepaald.
2. Alle "deeltjes", zoals elektronen, hebben eigenschappen zowel van een als van een deeltje. Men noemt dat de ..... en dit is een fundamentele eigenschap van licht en materie.
3. Atomen kunnen (continue/discrete) kleurenlijnen uitzenden, die karakteristiek zijn voor elk element. De kwantum atoommodellen van Bohr en De Broglie (en later Schrödinger) zullen dit verklaren.

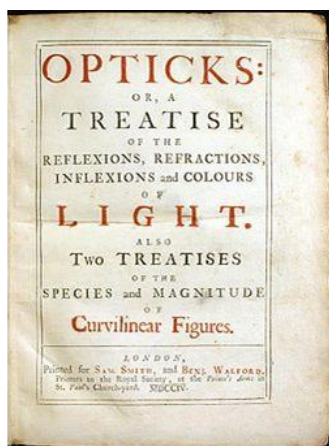
# Learning station II: Wat is licht?

## 1 Bestaat licht uit een stroom deeltjes?

Licht is alomtegenwoordig. Je zou misschien verwachten dat wetenschappers er daarom vrij gemakkelijk in zouden slagen om te achterhalen wat licht nu eigenlijk is. Maar net van licht is gebleken dat het maar met moeite zijn ware aard prijs geeft. Fysici hebben lang geworsteld met de vraag: is licht nu eigenlijk een stroom deeltjes of is het een golfverschijnsel?

Het verlangen om licht te willen begrijpen is, heeft de natuurkunde tot op de dag van vandaag, voortgedreven: van in de oudheid tot aan de moderne kwantumfysica. Laten we jullie daarom meenemen in deze zoektocht naar de ware aard van licht.

### 1.a Newtons deeltjestheorie voor licht



De grote Newton, die de natuurkunde gegrondvest had op 3 beginselen en een universele gravitatiewet, veronderstelde rond 1700 dat licht uit kleine deeltjes bestond. Deze lichtdeeltjes zouden natuurlijk ook massa hebben.

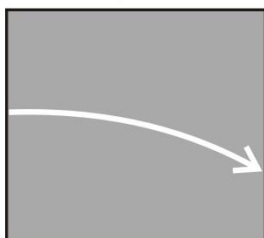
*Figuur 18*

*In zijn werk 'Opticks' verklaarde Newton de eigenschappen van licht met een deeltjestheorie (1704).*

*Maar in een latere editie introduceerde hij een alledoordringende ether die ook golfeigenschappen had. De deeltjes werkten dan in op de ether.*

*(Bron figuur: Wikipedia Public Domain).*

#### Gravitatie veld



Newton leidde uit zijn deeltjestheorie voor licht af dat een lichtstraal die evenwijdig met het aardoppervlak loopt, onder invloed van gravitatietheorie, zou moeten afbuigen naar beneden en dit ten gevolge van het aards gravitatieveld. Op die manier zou de baan van licht een parabool zijn en geen rechte lijn. Net zoals een kanonskogel die je horizontaal afschiet.

Dat we dit niet merken is – volgens Newton - omdat licht een heel hoge snelheid heeft. Hoe hoog de snelheid van licht was, was in Newtons tijd niet bekend, maar Galilei had al aangetoond dat het heel erg hoog moest zijn, mogelijks zelfs oneindig groot.

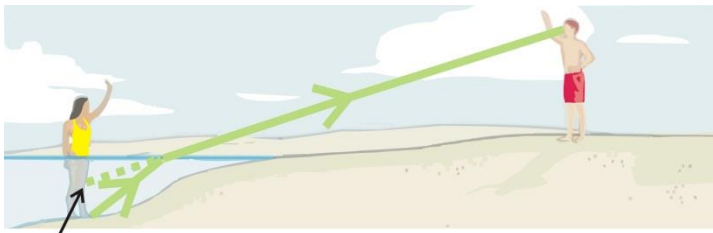
Een aantal eigenschappen van licht uit de geometrische optica kon Newton goed verklaren met zijn deeltjeshypothese. Sterker nog: in je secundair onderwijs, heb je zelf in de zogenaamde geometrische optica, licht opgevat als bestaande uit 'stralen'. Stralen die je kan opvatten als een stroom deeltjes.

i) **Noem tenminste 3 eigenschappen van licht (uit de geometrische optica) die je kan verklaren door licht op te vatten als een stroom deeltjes** (zoals Newton deed).

Naam eigenschap	Teken het verschijnsel schematisch	Kan je deze eigenschap van licht verklaren met een deeltjestheorie voor licht?
Licht heeft een constante snelheid		
...		
...		

**Maar zijn er geen eigenschappen van licht die je niet met de deeltjestheorie van licht kan begrijpen?**

Beschouw bv. het verschijnsel van de lichtbreking. Dit treedt op als het licht van middenstof verandert.



*Figuur 19  
Lichtstralen worden 'gebroken' als licht van middenstof wijzig.*

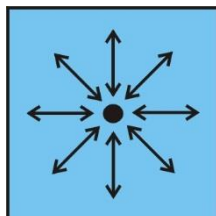
De voet lijkt zich hoger te bevinden

ii) **Kan je het breken van licht verklaren door licht op te vatten als een stroom deeltjes?**

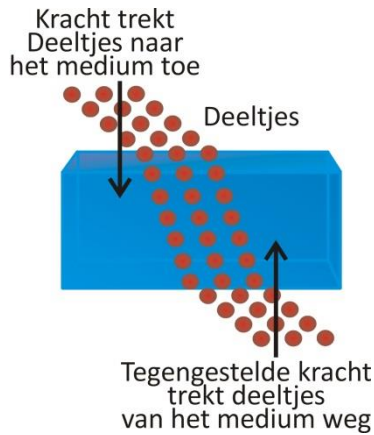
Ja/Nee

.....

Maar Newton verklaarde het **verschijnsel van breking wel degelijk met zijn deeltjestheorie!** Laten we eens kijken hoe.



*Newton veronderstelde dat lichtdeeltjes, als ze in een middenstof zoals lucht of water, terecht komen, aangetrokken zullen worden door de deeltjes van die middenstof. Dit wegens het bestaan van aantrekkingskrachten tussen deze deeltjes (gravitatie). Midden in een stof zijn de lichtdeeltjes langs alle kanten even sterk omringd door de deeltjes van de middenstof. Dit betekent dat de aantrekkingskrachten op het lichtdeeltje langs alle kanten even hard zijn en er netto geen effect is. Vandaar dat licht **rechtdoor** gaat zolang het in een bepaalde middenstof blijft.*



Figuur 20

*Bij de overgang van de ene middenstof naar de andere, is er geen ruimtelijke symmetrie meer: boven bevinden zich bv. lichtdeeltjes, onder water. De dichtere middenstof, in dit geval water, zou dan – volgens Newton – zorgen voor een netto-kracht in de richting van het water: de lichtdeeltjes worden daarnaartoe versneld wat een knik geeft in de 'lichtstraal'. Hierdoor ontstaat een 'knik' en dus breking. (Bron figuur: olympusmicro)*

Maar aan de grensoppervlakken ontstaat nu een verschil. Bv. bij de overgang van lucht naar water, zal het licht breken naar de normaal (= loodrechte op het wateroppervlak) toe. Dit komt omdat er meer materiedeeltjes in het water zijn dan in de lucht en dus worden de lichtdeeltjes feller naar de dichte stof toetrokken. Daardoor 'knikt' de lichtstraal en ontstaat **breking**.

De verklaring van Newton lijkt misschien wel te kunnen. Wie weet. Maar uit de redenering volgt wel een consequentie voor de snelheid van licht in de dichte middenstof in vergelijking met de ijlere lucht!

iii) **Wat volgt uit Newtons redenering over de snelheid van licht in water t.o.v. de snelheid van licht in de lucht?**

Kies uit:

$$v_{water} \quad \begin{matrix} < \\ > \\ ? \end{matrix} \quad v_{lucht}$$

Leg uit:

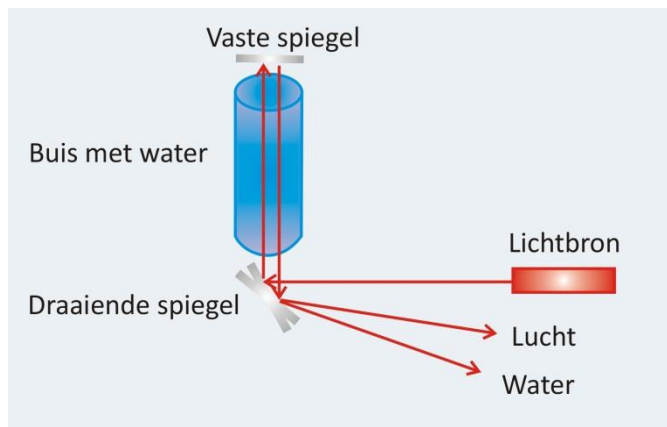
.....

.....

En kijk laat dit nu fysica zijn: zo een voorspelling kun je *verifiëren* in een experiment! In 1862 deed Léon Foucault precies dat (ja, dezelfde Foucault als die van de slinger van waarmee hij de rotatie van de aarde aantoonde!).

Foucault zette volgend experiment op waarin hij kon bepalen waar de lichtsnelheid nu groter is in water of in de lucht.

## 1.b Foucaults experiment vergeleek de lichtsnelheid in lucht met die in water.



*Figuur 21  
Voorstelling van Foucaults experiment dat de lichtsnelheid in lucht vergeleek met die in water.  
De spiegel eronder draait in deze voorstelling in wijzerzin.*

*(Bron figuur: University of Virginia  
<http://galileo.phys.virginia.edu>).*

*Foucault bouwde zijn opstelling in het Observatorium in Parijs. Hij liet een spiegel snel ronddraaien (met behulp van de toen beschikbare stoommotoren!). Deze spiegel draaide met 24.000 toeren per minuut!*

*Op deze spiegel scheen hij met een lichtbron. De straal ging omhoog door een buis en weerkaatste op een andere spiegel terug boven de buis. Na terugkaatsing beneden op de draaiende spiegel (die was ondertussen een beetje verder doorgedraaid) kwam de lichtstraal terug uit een beetje lager dan de bron waaruit ze vertrokken was (plaats waar 'air' staat in de figuur).*

*Dan herhaalde Foucault het experiment en vulde de buis met water. Als de snelheid van licht nu sneller zou zijn in water, dan zou het licht sneller terug op de in draaiende spiegel zijn (die dan niet zo ver doorgedraaid zou zijn) waardoor de terugkerende straal **boven** die van lucht zou uitgekomen zijn. Welnu, de terugkerende straal die door het water was gegaan kwam **onder** die van lucht terecht, wat onomstotelijk aantoonde dat de lichtsnelheid in water (LAGER/HOGER) was dan die in lucht.*

Dit experiment van Foucault was beslissend: er was geen ontkomen aan voor Newtons lichttheorie... Het toont aan hoe een theorie zoals Newtons lichttheorie op de helling kan komen te staan doordat het iets voorspelt (in casu een hogere lichtsnelheid in dichte stoffen) wat experimenteel niet kan bevestigd worden. Dit is typisch een manier hoe wetenschappen kan werken. Een fysicus zoals Newton die wel succesvol was met zijn mechanica, bleek het niet te zijn voor zijn 'mechanica voor licht'.

Het was duidelijk licht niet louter de mechanica van deeltjes volgt: wie weet is licht een golfverschijnsel?

## 2 Bestaat licht uit golven?

### 2.a De veronderstellingen van Christiaan Huygens

De Nederlander Christiaan Huygens (1629-1695) veronderstelde - tegen de opvatting van zijn beroemde tijdgenoot Newton in - dat licht een golf was. Het licht zou, zo dacht hij, kunnen ontstaan als een trilling die zich als een golf voortplant in de ruimte. Zoals een trillend voorwerp geluidsgolven opwekt die zich door de ruimte verspreiden of zoals een trilling op een wateroppervlak watergolven doet uitspreiden.

Deze gedachte werkt hij uit in zijn "Traité de la Lumière" (1690), kort voor Newtons theorie trouwens. Huygens steunde daarbij vooral op volgende overwegingen:

1. De lichtsnelheid is heel hoog en het is bijgevolg bijzonder onwaarschijnlijk dat licht een stroom deeltjes zou zijn. In dat geval zouden die lichtdeeltjes immers veel weerstand moeten ondervinden: volgens Newtons 2<sup>de</sup> wet, zouden ze daardoor stil moeten vallen zoals een bal die over een tafel rolt met veel weerstand.
2. Twee lichtbundels schijnen door elkaar heen zonder dat dit invloed heeft op elkaar. Hoe kan dat bij deeltjes?
3. Men kan het verschijnsel van lichtbreking verklaren door aan te nemen dat de voortplantingssnelheid van de golf verandert naargelang de stof waar het licht doorgaat: in dichte middens gaat de snelheid naar beneden (en niet naar boven)!

Laten we om te beginnen stilstaan bij de 2<sup>de</sup> eigenschap van licht, een evidente eigenschap die nochtans vaak over het hoofd wordt gezien!

### 2.b Hoe kan het dat lichtstralen elkaar kunnen kruisen?

Elk kind kan waarnemen dat kruisende lichtstralen geen invloed op elkaar lijken uit te oefenen. Het lijkt vanzelfsprekend, je kan het iedere dag waarnemen en precies dit verschijnsel deed Huygens twifelen aan Newtons opvatting dat licht een stroom deeltjes zou zijn. Huygens vroeg zich af:

**Waarom kunnen 2 lichtstralen elkaar kruisen zonder dat de lichtdeeltjes met elkaar botsen?**



**Als twee lichtstralen elkaar kruisen en hun weg verder zetten zonder elkaar te hinderen, hoe kunnen het dan deeltjes zijn??**

Mochten het deeltjes zijn dan zouden ze moeten botsen. Huygens zag in dat precies golven de eigenschap hebben dat ze ongehinderd door elkaar heen kunnen gaan. Ze zetten hun weg verder zetten alsof er niets gebeurd is.

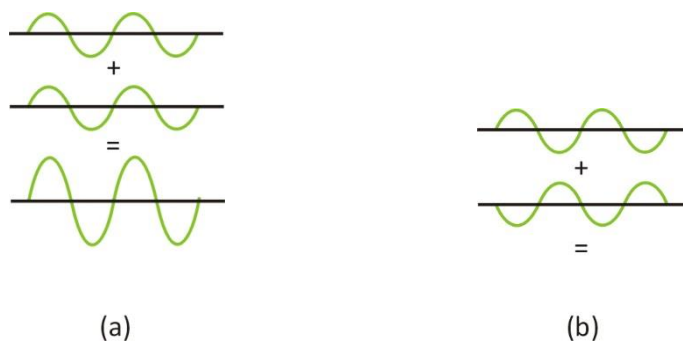
Bekijk de animatie op de site van het Institute for Sound and Vibration (University of Southampton, UK). Je ziet wat er gebeurt als twee golven mekaar tegenkomen.  
<http://web.bryanston.co.uk/physics/Applets/Wave%20animations/Sound%20waves/Superposition%20of%20Waves.htm>

## 2.c Welke uitwijking ontstaat op de plaatsen waar afzonderlijke golven samenkomen?

Ok, ze lopen door elkaar heen. Maar wat gebeurt er met hun uitwijking? Kijk eventueel nog eens terug naar de animatie.

.....

Twee golven lopen door elkaar heen, op de gemeenschappelijke plaatsen, tellen hun uitwijkingen op. De resulterende uitwijking is de som van de deeluutwijking van de afzonderlijke golven. Deze eigenschap van golven wordt **superpositie** of **interferentie** genoemd. Dit kan ertoe leiden dat 2 golven zich versterken, maar door superpositie kunnen 2 golven elkaar ook uitdoven. Kijk hieronder hoe de uitwijkingen superponeren.

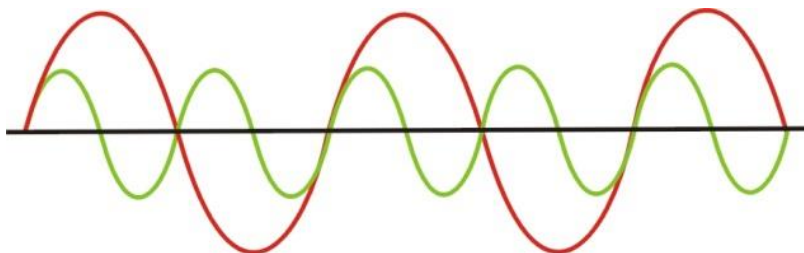


Als de top van de ene golf en een dal van de andere golf op hetzelfde moment in een punt samenkomen, zeggen we dat de trillingen in dat punt in TEGENfase toekomen. De golven verzwakken mekaar. Kan je de resulterende golf tekenen in figuur (b)?

Wat je in figuur (a) ziet, noemen we **constructieve superpositie** of interferentie. In figuur (b) is er **destructieve superpositie** of interferentie.

### Oefening:

Teken hieronder de resulterende uitwijking van volgende 2 golven die door elkaar heenlopen. Wat moet je telkens doen om de resulterende uitwijking te vinden?



## 2.d Golffront, golflengte, periode

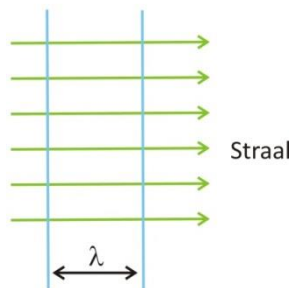
Als je een steen in stilstaand water gooit, zie je cirkels ontstaan, die groter en groter worden. Die cirkels worden gevormd door deeltjes die op hetzelfde ogenblik beginnen te trillen. De lijn of het oppervlak gevormd door die deeltjes noemen we een golffront. Alle deeltjes van eenzelfde golffront gaan gelijk op en neer.

Er zijn eigenlijk oneindig veel golffronten, maar meestal tekenen we enkel de golffronten voor die deeltjes die zich in een positief maximum bevinden.

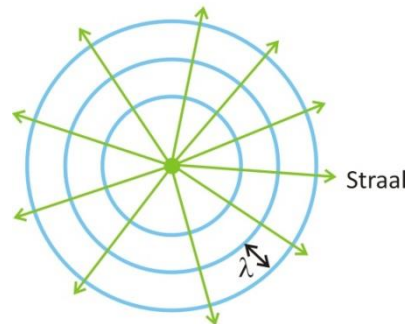
Golffronten kunnen verschillende vormen hebben:

- lijnen of vlakken: dan spreken we van **vlakke** golven, bv. geluidsgolven in een tunnel;
- cirkelvormig: dat zijn **circulaire** golven, bv. golven op een wateroppervlak;
- bolvormig: dat zijn **sferische** golven, bv. geluidsgolven in de ruimte.

Vlak golffront



Sferisch golffront



De **golfstraal** door een punt geeft de richting weer waarin het golffront van in dat punt beweegt. Golfstralen staan loodrecht op de golffronten.

Na een zekere afstand herhaalt het golfpatroon zich. De afstand waarover het kenmerkende golfpatroon zich uitstrekt, is de **golflengte  $\lambda$** . Duid op onderstaande tekening op 4 verschillende plaatsen de golflengte aan:



De *tijd* die een golf nodig heeft om zich over één volledige golflengte voor te planten, noemt men de **periode**  $T$ .

Zo kan een golf bv.  $\frac{1}{2}$  seconde nodig hebben om zich over een golflengte voor te planten. Zo een golf komt ... keer per seconde voorbij en heeft dus een **frequentie** van 2 Hz.

Een golf die in een  $\frac{1}{10}$  van een seconde zich verplaatst over één golflengte, komt per seconde ... keer voorbij. Deze golf heeft een frequentie van .... Hz. (Hz betekent gewoon 'per seconde')

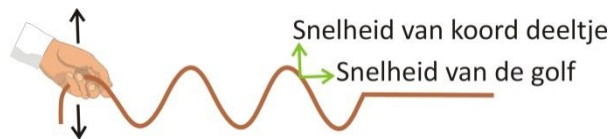
Frequentie en periode zijn dus omgekeerd evenredig:

$$f = \frac{1}{T}$$

**Oefening:** Indien een golf een frequentie heft van 1000 Hz, hoe lang is dan de tijdsperiode van die golf?

## 2.e Snelheid van een golf

Foucault toonde met zijn experiment dat de voortplantingssnelheid van licht in water (lager/hoger) is dan in lucht. Huygens verklaarde precies hiermee het verschijnsel van de breking.



Het verband tussen de golfsnelheid, de golflengte en de periode is als volgt in te zien:

De golfsnelheid  $v$  is natuurlijk  $v = \frac{\text{afgelegde afstand}}{\text{tijd}}$

Neem bv. als afstand de golflengte dan krijgen we:

$$v = \frac{\lambda}{T} = \lambda f$$

De snelheid waarmee een golf zich kan voortplanten hangt af van de eigenschappen van het medium zoals dichtheid, samendrukbaarheid en spankracht beïnvloeden.

Zo is de geluidssnelheid in lucht (bij 20°C) gelijk aan 343 m/s terwijl het in water haast 1500 m/s is. De snelheid van licht in vacuüm is (afgerond) 300.000 km/s of  $3,0 \cdot 10^8$  m/s. De snelheid van licht in de lucht of in vaste stoffen (zoals glas) ligt lager dan deze waarde.

Toepassing: Een radiostation zendt radiogolven uit met een frequentie van 88,1 MHz. Wat is de golflengte van de radiogolven? (Antwoord: 3,4 m)

.....

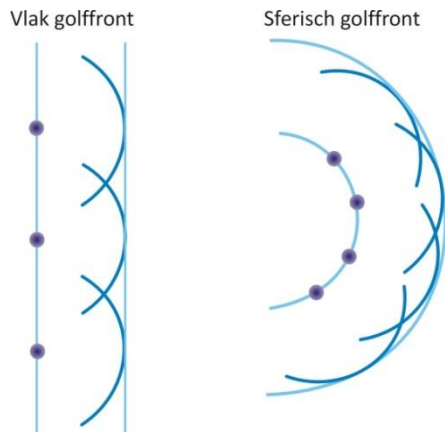
## 3 Hoe Huygens eigenschappen van licht kon verklaren

### 3.a Het principe van Huygens

Keren we nu terug naar de gedachten van Huygens. Je weet dat als je vlakke golven in water wil maken, je met een plaat verticaal op en neer kan bewegen in het water.

Nu vroeg Huygens zich af of zulke golven je niet kan laten ontstaan door slechts een aantal golfbronnen op een rij te nemen. Gebruik bv. i.p.v. een plaat, een reeks stiften die

op en neer bewegen, dan zijn de stiften puntvormige golfbronnen. Zorg ervoor dat deze mooi in fase trillen (dit wil zeggen gelijk op en weer neer gaan). Al deze puntbronnen zenden dan *circulaire golven* uit. Deze uitwaaiende golven komen na een bepaalde afstand op dezelfde plaats: daar lopen ze door elkaar heen, maar hun uitwijkingen moeten dan superponeren. Dit gebeurt precies op een plaats (een halve golflengte na) achter het vorige golffront waaruit ze ontstaan zijn.



Huygens besloot:

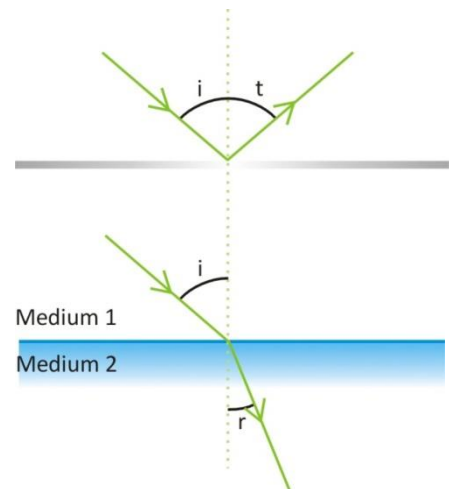
*Elk golffront kan beschouwd worden als een reeks puntvormige bronnen die in fase trillen en van waaruit circulaire golven vertrekken. Dat is het principe van Huygens.*

### 3.b Weerkaatsing en breking verklaren met golftheorie

Op basis van het principe van Huygens kan je aantonen waarom

- bij de terugkaatsing van lichtstralen de invalshoek gelijk is aan de terugkaatsingshoek.
- bij de breking van lichtstralen op het grensvlak van twee materialen de lichtstralen zo breken dat de verhouding tussen de voortplantingssnelheden gelijk is aan de verhouding van de sinus van de invalshoek *i* gedeeld door sinus van de brekingshoek *r*

$$\frac{\sin(i)}{\sin(r)} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1} = n_{1 \rightarrow 2} = cte$$



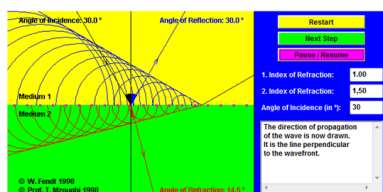
Bestudeer hiervoor de applet van Walter Fendt:

[www.sciencejoywagon.com/physicszone/otherpub/wfendt/huygens.htm](http://www.sciencejoywagon.com/physicszone/otherpub/wfendt/huygens.htm)

Deze

#### Reflection and Refraction of Waves (Explanation by Huygens' Principle)

the reflection and the refraction of waves by the principle of Huygens. Explanations for each the "Next Step" button. You can stop and continue the simulation by using the "Pause / Resume" button. The medium with the smaller index of refraction:



applet laat heel mooi de redenering van Huygens zien:

*hoe de verandering van de golfsnelheid bij het binnendringen van een nieuw materiaal verantwoordelijk is voor de breking van de golf.*

### 3.c Diffractie verklaren met golftheorie

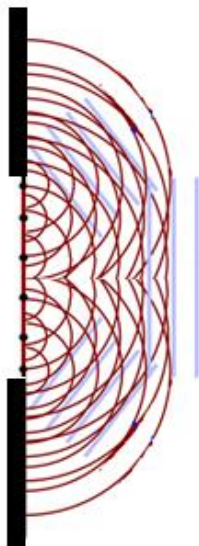


Golven weerkaatsen, breken, maar kunnen ook afbuigen aan een opening of een hindernis. Dit noemen we buiging of **diffractie**.



Bij geluidsgolven kun je dat merken: iemand in een naburige kamer kun je horen praten als de deur openstaat. Ook zeegolven buigen na doorgang door een smalle opening.

*Buigen van zeegolven bij Voidokilia beach in de westelijke Peloponnesos, Greece*



Diffractie kan ook verklaard worden met het principe van Huygens: elk punt in de opening of aan de rand van de hindernis gedraagt zich immers als een puntbron die golffronten in alle richtingen uitzendt.

De mate van diffractie hangt af van de **verhouding van de opening of hindernis tot de golflengte**.



**Oefening:** Kunnen golven buigen rond een obstakel (in plaats van rond een opening)? Kan je dat uitleggen door hieronder de golven te tekenen?

**Oefening:** Hoe lang zijn geluidsgolven?

Bereken voor een toon met frequentie 440 Hz de golflengte:.

.....(Antw.: 0,773 m).

Openingen en hindernissen met een grootte-orde van die golflengte geven een merkbare diffractie.

**Oefening:** Hoe lang zijn de golflengtes van zichtbaar licht?

Zichtbaar licht heeft een frequentie die veel groter is dan die van geluid.

Bereken de golflengte van rood licht dat een frequentie heeft van 500 THz (Tera =  $10^{12}$ , je zal ook de lichtsnelheid nodig hebben, indien je die niet weet, moet je die even opzoeken)

.....(Antw.: 600 nm).

Zal licht buigen rond een raam? Waarom wel of waarom niet?

.....

Zal je diffractie van licht waarnemen rond smalle openingen of obstakels? Waarom?

.....

**Diffractie in het dagelijks leven:**

- Waarom creëren geluidsschermen langs autosnelwegen geen volledige stilte?  
.....
- Geluidsgolven kunnen heel lang zijn en van dezelfde grootteorde zijn als de afmetingen van het scherm zelf. Daarom zullen geluidsgolven meer rond een obstakel zoals een geluidsscherm buigen.

Bereken de **golflengte** van geluid van 1000 Hz. Vergelijk dat met de golflengte van geluid van 100 Hz sound. Welk van de twee zal een geluidsscherm beter dempen, lagere tonen of net hogere?

.....

(Antw.:  $\lambda=3,4$  m for 100 Hz and  $\lambda= 0,343$  m for 1000 Hz.)

## 4 Het 2-spleten experiment voor licht

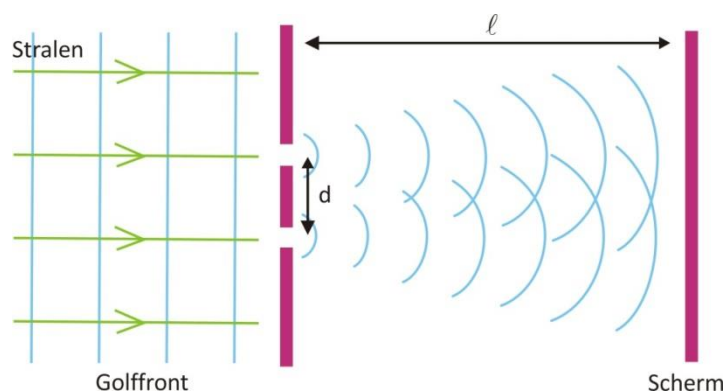
Laten we nu terugkeren naar het dubbelspleetexperiment voor licht. Pas in 1803 toonde Thomas Young (1773-1829) in zo een experiment aan dat licht interferentie vertoonde, wat een typische eigenschap van golven is!

Hoewel men dacht, dat hiermee definitief was aangetoond dat licht golven was, bleef de vraag naar de aard van die golf open. Wat er golft bij licht behandelen we in het volgende leerstation.

Maar laten we eerst kijken naar het beroemde 2-spleten experiment, waarbij we licht als *golven* opvatten.

### 4.a Waarom ontstaan er maxima en minima in het 2-spleten experiment?

Een lichtbron produceert licht in de vorm van vlakke golffronten. Die komen een obstakel met twee spleten tegen. Volgens het principe van Huygens, wordt aan elke spleet een golffront geproduceerd dat gebogen is en punten achter het obstakel kan bereiken.



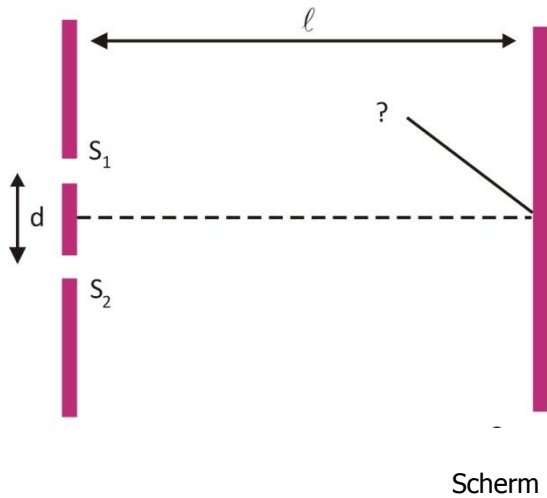
Na het obstakel zijn er dus twee golven met ronde golffronten die overlappen in een zeker gebied van de ruimte. Ze gaan dus superponeren of *interfereren*. Omdat deze twee golven voor de spleten één enkele golf waren, moeten zij noodzakelijk op de plaats van de spleten *in fase* zijn.

In de tekening hierboven zijn alle elementen van de opstelling duidelijk weergegeven. Precies daarom zijn de verhoudingen tussen de verschillende afmetingen en afstanden niet zo goed als in het werkelijke 2-spleten experiment. Zo zijn in het experiment de spleten veel dunner in vergelijking met hun onderlinge afstand  $d$ . Men kan de spleten in eerste instantie als *puntvormig* beschouwen. Ook staat in werkelijkheid het scherm veel verder van de spleten af.

Hoe kan het nu dat op het scherm een patroon van licht en geen licht ontstaat?

Aan de spleten zijn de golven in fase: ze gaan tegelijk op en neer. Maar achter de spleten komen golven toe afkomstig van de ene spleet en van de andere. Maar die twee golven hebben niet noodzakelijk dezelfde afstand afgelegd. Door dit weglengteverschil zijn ze niet meer noodzakelijk in fase.

4.b Verschillende weglengte, andere fase



**Opdracht: Voorspel wat je krijgt precies midden achter de 2 spleten en waarom? (**

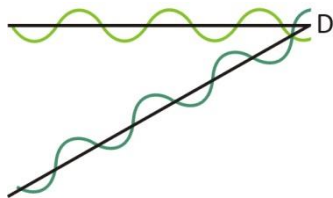
.....  
 .....



Bv. in de zone midden achter de 2 spleten (waar de 1 staat), is er geen weglengteverschil. De golven waren in fase aan de spleten en zijn ze het nog in punt C?. (JA/NEE)  
 Ze gaan tegelijk op en neer en versterken elkaar: er treedt een helder maximum op: plaatsen van **constructieve interferentie**.

Een beetje meer naar links (of naar rechts) is de afgelegde afstand tot de ene spleet kleiner als die vanaf de andere spleet. . Zijn de golven daar nog in fase? (JA/NEE).

Het weglengteverschil zal inderdaad afwijken een beetje uit het centrum.



Voor een bepaalde hoek is het **weglengteverschil precies een halve golflengte**: de ene golf gaat omhoog, terwijl de andere naar beneden gaat. Indien de amplitude dezelfde is, betekent dit de totale uitdoving. (Punt 'D' op de figuur). Er treedt **destructieve interferentie** op.

Voor grotere hoeken treedt weer een golflengte weglengteverschil op. Beide golven zijn terug in fase: er treedt versterking op: maxima (3). Voor grotere hoeken weer minima enz. Men noemt dit plaatsen van destructieve interferentie.

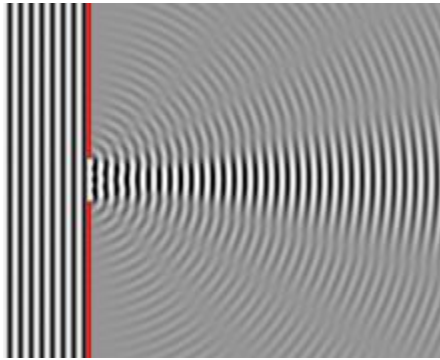
**Opdracht: Als de golflengte van het licht verkleint, zie je dan meer of minder maxima op het scherm? Kan je dit verklaren?**

.....  
 .....



*Franjes van een dubbelspleetexperiment met rood laserlicht*

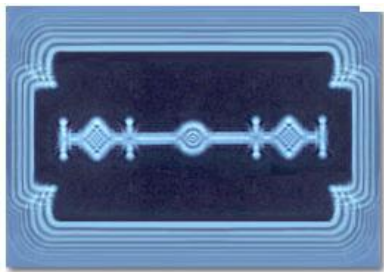
## 5 Diffractie franjes bij ene één-spleetexperiment



Ook bij een één-spleetexperiment is er een verschil in weglengte tussen de verschillende golven die vertrekken bij de Huyghens bronnetjes. Daarom zullen ook de golven van deze verschillende Huygens bronnen gaan superponeren: de uitwijkingen op verschillende plaatsen tellen op.

Naargelang het fazeverschil, zullen weer maxima en minima ontstaan ook in een één-spleetexperiment.

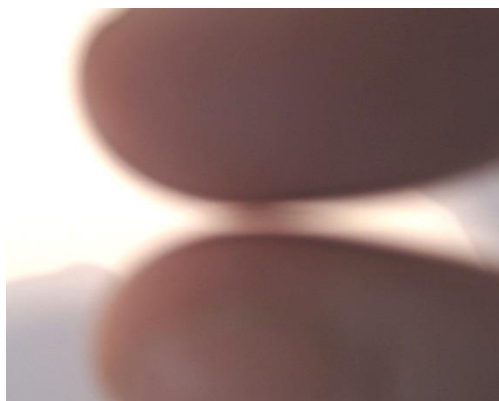
### ***Diffractie franjes van licht in het dagelijks leven?***



Als licht een dagelijks voorwerp tegenkomt, zal je meestal niet veel opmerken van de buiging omdat de golflengtes van zichtbaar licht klein zijn vergeleken bij de afmetingen van de meeste voorwerpen uit het dagelijks leven. Toch kan je in bepaalde gevallen diffractie waarnemen in het dagelijks leven:

*Lichtdiffractie aan de dunne randen van een scheermesje.*

**Experiment:** diffractie tussen duim en wijsvinger



Kijk naar het ontstaan van diffractiemaxima en – minima als je je duim en wijsvinger steeds korter op elkaar brengt (zonder dat ze elkaar raken). Je kan het het best zien tegen de achtergrond van een wit blad.

**Experiment:**

In de hands-on experimentenbundel die hoort bij deze leerstations, staat een experiment beschreven om met met diffractie rond een haar, de dikte van het haar te bepalen door de afstanden tussen de minimal te meten.

## 6 Concepts in Learning Station II

Vervolledig de ontbrekende concepten:

### **Klassieke concepten**

Eigenschappen van licht *verklaard met de deeltjestheorie van licht:*

- licht heeft een constante snelheid die echter steeds afhangt van .....  
*waardoor het licht gaat.*
- oppervlakken waarop licht straalt, warmen op.
- weerkaatsing.

Eigenschappen van licht *NIET verklaard met de deeltjestheorie :*

- *Bij overgang tussen 2 verschillende middenstoffen: .....*
- Constructieve en destructieve ..... van golven.
- Diffractie van golven.
- Eigenschappen van golven zoals: snelheid, frequentie, golflengte, periode.
- Het principe van Huygen.

### **Kwantumconcepten**

*Geen!*

# Learning station III: Wat golft er bij licht?

Licht is een golf, daar ben je nu van overtuigd. Maar **een golf waarvan?**

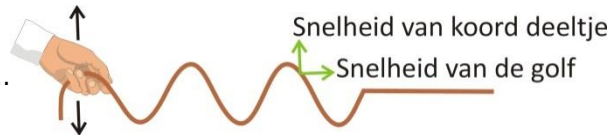
We kijken eerst eens naar mechanische golven zoals we die kennen in een touw, in water of in geluidsgolven. Daarna zoeken we naar de eigenschappen van zulke golven en ga na of die ook voor licht gelden. We hopen zo de aard van lichtgolven te ontsluiten: uit welke golven bestaat licht?

## 1 Mechanische golven

### 1.a De bron van mechanische golven

Laten we eerst aan een golf in een touw denken. Hoe ontstaat de golf in een touw? Wat is de bron van de golf?

.....



Als je kijkt naar een klein stuk touw, welk soort beweging doet dit stuk terwijl de golf door het touw loopt?

.....

Het is de oorspronkelijke trilling die zich voortplant..

Ook elk geluid ontstaat met een trilling als bron. Wat trilt er bv. als je geluid hoort van

- een gitaar? .....
- een piano? .....
- een motor? .....

**Geluid** is dus ook een **trilling** die zich **voortplant**. Zo ontstaat een geluidsgolf. Laten we dit verder bekijken.

### 1.b Medium nodig?

De **trilling** kon zich in het touw **voortplanten** doordat de moleculen in het touw samenhangen.

**Heb je nu altijd een middenstof, een medium nodig, waarin een golf zich kan voortplanten?**

**Heeft geluid een medium nodig?**

Als je een gitaarsnaar in vacuüm laat trillen, zal je dan iets horen?

*Ja/Nee*

Waarom wel of waarom niet?

.....

Deze geluidsgolf kan zich ook maar voortplanten omdat de deze trillingen van de luchtdeeltjes doorgegeven worden van het ene molecule naar het volgende. Geluidsgolven hebben dus ook een middenstof nodig om zich voor te planten.

*Mechanische golven hebben een middenstof nodig.*

**Heeft licht een medium nodig?**

Maar het **licht** kan toch door **vacuüm**, of niet? .....



Denk ook aan de ruimte tussen de **zon** of de **sterren** en de **aarde**: daar is geen lucht en quasi geen materie: het is leeg. We kunnen hier toch het licht van de zon en dat van de sterren zien! Licht kan zich blijkbaar door het niets voortplanten. Welk soort golf is licht dan?

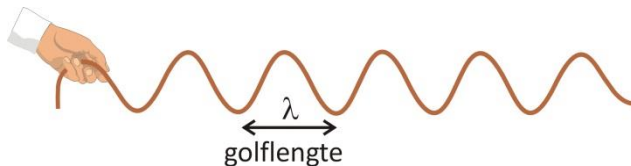
Denk ook aan de vele vormen van **draadloze communicatie** die we dagelijks gebruiken zoals Wifi, of de signalen van het gsm- of gps-netwerk. Daarmee dragen we ook informatie over van de ene plaats naar een andere door golven. Zijn deze golven niet van dezelfde aard als licht?

Kunnen deze signalen zich ook door vacuüm voortplanten, of heb je lucht of een andere middenstof nodig? .....

**1.c Voortplanting en uitwijking in zelfde zin of andere zin?**

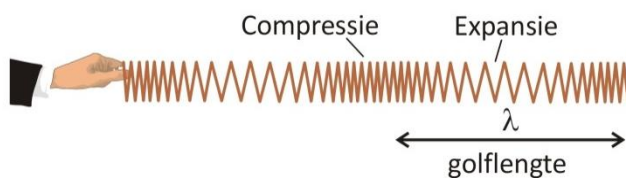
Wanneer een trilling zich voortplant in de ruimte ontstaat er een golf. De golf kan zich nu voortplanten:

- a. loodrecht op de uitwijking van de trilling



De trilling van de bron (verticaal) doet andere deeltjes in de buurt meetrillen. Je ziet een golf ontstaan in horizontale richting. De bewegingsrichting van de trilling staat dus (in dezelfde richting als/loodrecht op) de voortplantingsrichting van de golf. Dit noemt men een **transversale** golf.

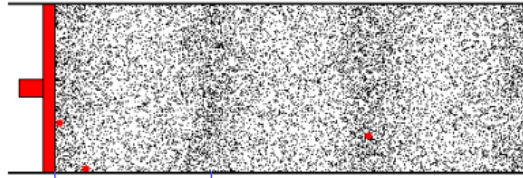
- b. in dezelfde zin als de uitwijking van de trilling



De bewegingsrichting van de trilling is nu (in dezelfde richting als/loodrecht op) de voortplantingsrichting van de golf. Dit noemt men een **longitudinale** golf. Er treden verdichtingen en verdunningen op.

Zijn geluidsgolven transversaal of longitudinaal?

.....



*Figuur 22:  
Een geluidsgolf ontstaat doordat de luchtdeeltjes meer of minder op elkaar gedrukt worden.  
Deze drukgolf plant zich longitudinaal voort.  
Bron: Educational Materials of The Institute of Sound and Vibration Research, Southampton, UK)*

We kunnen ons nu moeilijk voorstellen of licht, dat blijkbaar niet eens een medium nodig heeft, longitudinaal of transversaal zal zijn.

Laten we kijken of licht ook verder eigenschappen heeft van golven. Indien ja, dan ondersteunt dat onze hypothese dat licht een zich voortplantende trilling is: een golf dus.

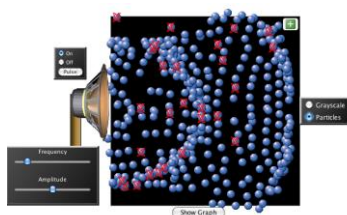
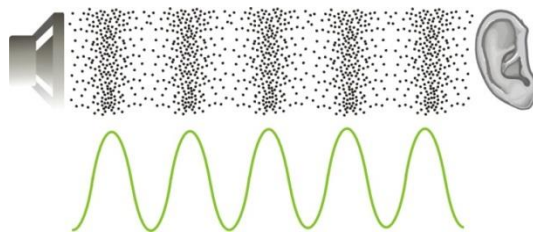
### 1.d Verplaatsen deeltjes met een golf mee?

Kan je zeggen dat de trillende deeltjes met de golf mee bewegen?

.....

Bestudeer eventueel de animaties van longitudinale en transversale golven op de site van het isvr [http://resource.isvr.soton.ac.uk/spcg/tutorial/tutorial/Tutorial\\_files/Web-basics-nature.htm](http://resource.isvr.soton.ac.uk/spcg/tutorial/tutorial/Tutorial_files/Web-basics-nature.htm)

De deeltjes bewegen lokaal heen en weer, maar verplaatsen zich netto niet. Het is de storing, de golf, die zich verplaatst. Het is de energie van de uitwijking die continu wordt doorgegeven en die zich wel verplaatst.



Bij een geluidsgolf blijven de luchtdeeltjes trillen rond hun evenwichtspositie. De storing plant zich voort: de energie van de trilling die het geluid veroorzaakt, verplaatst zich door de ruimte en doet je trommelvlies mee trillen. Dit wordt duidelijk geïllustreerd met de Phet-animatie <http://phet.colorado.edu/en/simulation/wave-interference>

## 1.e De bron van lichtgolven

Geluid ontstaat dus als een trilling. Wanneer een trilling zich voortplant in de ruimte, ontstaat een geluidsgolf.

Als licht een golf is, kunnen we veronderstellen dat het licht ook bij een of andere **trilling** moet ontstaan. Maar vanuit welke trilling ontstaat licht dan? Dit is niet zo eenvoudig in te zien. De Nederlandse natuurkundige Christiaan Huygens zag in dat – als licht inderdaad een golfverschijnsel is – het wel degelijk uit een trilling moest ontstaan.

Huygens veronderstelde hij dat licht – omdat het veelal ontstond in hete voorwerpen (een kaars, een gloeiend metaal, gloeiend hout...) ontstond door het heftig **trillen van deeltjes** in de hete stof.

Hij veronderstelde bovendien dat de **trillingsfrequentie voor licht veel hoger** moest zijn dan voor geluid.



*Een heet voorwerp zoals de zon of een heet metaal, straalt licht uit. Zouden de trillingen van deeltjes in de stof de bronnen kunnen zijn van deze lichtgolven?*

Neem als voorbeeld een metaal dat je in een vlam houdt: kan je aan de kleur van het warme metaal zien hoe warm het is: gewoon warm of echt heet?

.....



Wat kan je afleiden van uit de kleuren van sterren?

Rode sterren zijn koud, met temperaturen rond 3000 K, terwijl blauwe sterren heter zijn: tot meer dan 30.000 K .  
Onze zon heeft een temperatuur van 6.000 K (aan het oppervlak).

Bekijk de figuur hiernaast. Linksboven zie je het sterrenbeeld Orion. De rode superzware ster Betelgeuze is herkenbaar aan zijn koel rode licht (linksboven). Rechts onder in het sterrenbeeld zie je de witte ster Rigel. Kan je ze vinden?

*Het sterrenbeeld Orion, hier gefotografeerd boven de Nemrut Dagı berg in Turkije. Bron: Astronomy picture of the Day, Nasa*

**Oefening:**

Welke frequentie heeft zichtbaar licht? (Zoek dit op) .....

Was Huygens zijn veronderstelling juist dat licht een heel hoge vibratiefrequentie heeft? (Ja/nee)

Hoeveel maal groter is de frequentie van zichtbaar licht in vergelijking met de frequentie van een toon van 440 Hz (wat overeenkomt met een 'la' in muziek)?

.....

Dus hetere objecten zenden licht uit met een hogere frequentie dan koelere objecten, licht van hete voorwerpen zal dus (RODER/BLAUWER) zijn. Huygens veronderstelde dat er in de stof iets trilde en dat deze trilling de emissie van licht vanuit een stof veroorzaakt. Hoe heter het materiaal is, hoe sneller de deeltjes in de stof zullen trillen en hoe hoger de frequentie van het uittredend licht zal zijn.

**Maar eens dat het licht de materie verlaten heeft,  
wat trilt er dan in licht terwijl het licht zich als een golf voortplant?**

## 2 Licht: wat golft er?

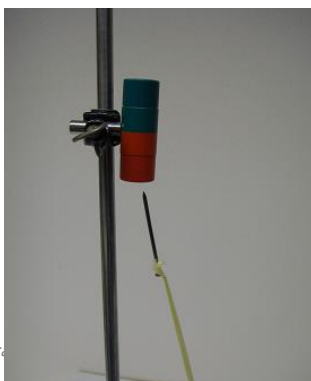
Je kan licht niet oppakken en in je zak steken. Licht heeft **geen medium** nodig om zich voort te planten zoals water- of geluidsgolven. Licht kan doorheen het vacuüm. Het kan dus geen mechanische golf zijn zoals een geluidsgolf of een golf in een touw.

Maar als licht een golf is en tegelijk geen medium nodig heeft, stelt zich de vraag: wat kan er golven doorheen het vacuüm? Laten we daarom kijken naar fysische grootheden die in het luchtledige kunnen bestaan. We denken dan aan 'velden' zoals magnetische velden zoals je die aantreft rond een magneet. Of elektrische velden rond een geweven staaf. Ook zwaartevelden verspreiden de zwaartekracht zonder contact. Zulke krachtvelden hebben geen medium nodig en de krachtwerking die ze veroorzaken, verspreidt zich wel degelijk doorheen de lege ruimte.

Dus misschien zitten we op de goede weg als we veronderstellen dat licht uit zo een veranderend veld zou kunnen bestaan. De verandering van de sterkte van het veld zou dan de 'trilling' kunnen zijn die zich voortplant als een golf. Dus laten we eens kijken naar (veranderende) velden die kandidaat kunnen zijn om lichtgolven te zijn.

### 2.a Kracht(velden) die werken door het vacuüm

#### i) Het magnetisch veld



Je herinnert je zeker uit je kindertijd hoe fascinerend het kan zijn om met magneten te spelen. Als je twee magneten op een bepaalde afstand van elkaar houdt, kan je de **kracht** voelen die de magneten op elkaar uitoefenen.

Is **contact** tussen de magneten nodig om de kracht over te brengen?

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

Oefenen de magneten ook een kracht op elkaar uit als zij in **vacuüm** zijn? *Ja / Nee*

De magnetische kracht wordt blijkbaar overgebracht zonder middenstof. De magneet wekt een magnetisch veld op. De ruimte rond de magneet krijgt dus een nieuwe fysische eigenschap, het magnetisch veld.

Als een nagel of zo geplaatst wordt in een punt waar het veld aanwezig is, gaat er een kracht optreden die geen medium nodig heeft. Zo een kracht wordt opgewekt door het veld zelf, ze werkt **op afstand** en **zonder contact**.

**ii) Het elektrisch veld**



Je hebt zeker ook al eens gezien hoe jij je haar kan aantrekken met een (nylon) kam en dit zonder contact. Hier gaat het om een elektrische kracht. Hier heb je ook een aantrekkingskracht op een afstand, contact is niet nodig, tussen haar en kam.

Tussen de haren zelf is er een elektrische afstotingskracht die ook zonder contact werkt!

Rond de kam en tussen de haren, heerst een **elektrisch veld**. Waar een elektrisch veld is, kan een elektrische kracht optreden die werkt *op afstand zonder contact*.

**iii) Andere velden**

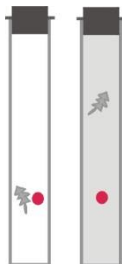


Naast de elektrisch en magnetisch veld is misschien nog de meest voor de hand liggend veld: het zwaarteveld. Welke kracht hebben we het hier?

.....

Newton stelde in 1687 reeds dat er een universele gravitatiekracht aanwezig was tussen massa's bv. tussen de zon en de aarde.

Is dit ook een voorbeeld van kracht veroorzaakt door een veld? *Ja / Nee*



Werkt dit veld ook doorheen het vacuüm of is er een middenstof nodig?

.....

Vallen voorwerpen ook in vacuüm?

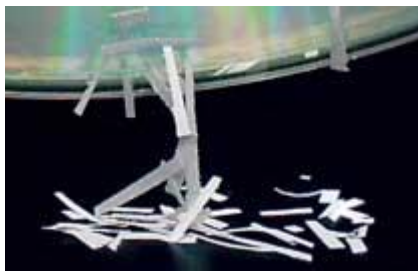
.....

**iv) Kracht op afstand veroorzaakt door velden!**

Aanvankelijk vonden fysici aan kracht op afstand "Actio in distans", een kracht werkend doorheen het niets, een vreemd idee. Maar ze hebben de idee van "kracht op afstand" toch als essentieel deel van de natuur opgenomen in het begrip: "veld". Sindsdien blijkt dit begrip veld een centraal concept te zijn in elke fysische theorie! We vinden het begrip veld terug in de gravitatie-theorie, de theorie van het elektrisch en van het magnetisch veld.

Noem 3 krachten die het gevolg zijn van een veld dat ook door vacuüm heen werkt:

1. ....
2. ....
3. ....



*Rond een door wrijving elektrisch geladen CD ontstaat een elektrisch veld. De aanwezige ladingen in de atomen van papiersnippers kunnen worden aangetrokken door dit veld. (Bron foto: Wikipedia)*

Er is iets wat het veld veroorzaakt. Bv. een massa, een lading of een magneet. We zeggen dat dit de bron is van het veld. Een massa is bv. de bron van een gravitatieveld, een lading is bron van een elektrisch veld, een magneet is bron van een magnetisch veld.

Rond deze bron ontstaat dan een ruimte waarin het veld werkzaam is.

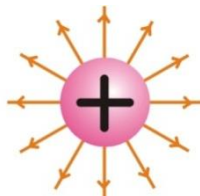
De **kracht** is dus een **gevolg** van de aanwezigheid van een **veld**.

**2.b Velden die veranderen in de tijd: golven van een veld**

Kan licht nu een golf zijn van een veranderend elektrisch en magnetisch veld dat zich voortplant?

Tot nu toe veranderden de beschreven velden niet in de tijd: het waren statische velden.

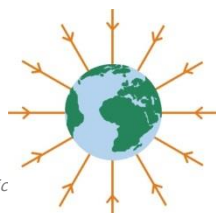
**Voorbeeld: het elektrisch veld**



Indien de bron van het veld niet beweegt, is het veld statisch. Hier zie je bv. een voorstelling van een afstotend elektrisch veld rond een positieve elektrische lading. Fysici tekenen denkbeeldige veldlijnen die aangeven dat er een veld 'in de ruimte aanwezig is'.

Indien je een andere positieve lading plaatst in dit veld, zal er een afstotende veldkracht optreden in de richting van de veldlijnen.

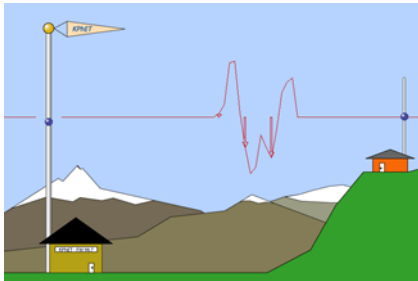
**Voorbeeld: het gravitatieveld**



Beschouw bv. het aantrekkend zwaarteveld rond de aarde. Plaats je een massa in dit zwaarteveld, dan zal er een zwaartekracht optreden (gericht naar het middelpunt van de aarde).

Is het nu voorstelbaar dat zo een veld kan variëren in de tijd? Wat moeten we dan doen? *Misschien moeten we dan de bron van het veld laten bewegen?*

**De Antenne opnieuw bekeken:**



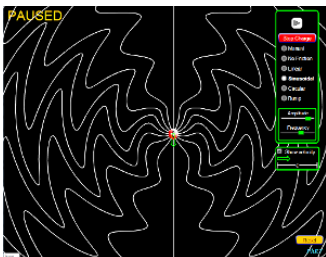
Een versnellende lading in een antenne, zendt radiogolven uit. Kijk daarvoor opnieuw naar de Phet applet van een zendantenne: [phet.colorado.edu/en/simulation/radio-waves](http://phet.colorado.edu/en/simulation/radio-waves).

Wat trilt er nu in de antenne?

De lading is hier de bron van het veld. Welk soort veld is het dan? .....

Door de trilling van de lading is het opgewekte elektrisch veld (statisch/ niet statisch). De richting van het elektrisch veld verandert voortdurend door de trilling van de bronlading. Het is precies *deze verandering in de veldsterkte* die zich voortplant in de ruimte als een **golf. Een golf van een veranderend elektrisch veld.**

**Trillende ladingen:**



Onderzoek verder met volgende Phet-applet hoe je een statisch elektrisch veld kan laten veranderen met de tijd.

<http://phet.colorado.edu/en/simulation/radiating-charge>

Dus trillende ladingen kunnen golven veroorzaken van een anders statisch elektrisch veld.

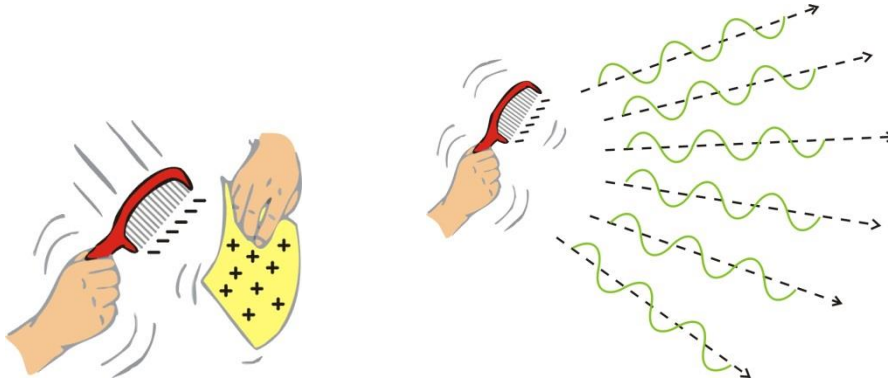


Kan je een experiment bedenken om een elektrisch veld te maken dat varieert met de tijd en om de effecten ervan te kunnen waarnemen?

.....  
 .....

**Experiment:**

Als je een negatief geladen kam heen en weer laat bewegen, kan je ook een blad papier op een afstand laten trillen!



Ook dit kunnen wij begrijpen als we veronderstellen dat het veld opgewekt door de geladen kam, met de tijd kan variëren zoals een golfbeweging dat doet. Dit verklaart precies de waargenomen bewegingen van het blad papier.

### Experiment: Een trillend magnetisch veld

Ook een magnetisch veld kan je laten trillen. Neem een magneet en hou ze onder een doorzichtige plaat ijzervijlsel. Merk je dat de snippers worden aangetrokken? Beweeg de magneet nu heen en weer? Reageren de snippers nu op dit trillend magnetisch veld?

Is er contact tussen de trillende magneet en de snippers? (Ja/Nee)

**Dat een veld golft is perfect voorstelbaar:  
de golf van het veld kan zich in vacuüm voortplanten,  
omdat het veld zelf ook al in vacuüm kon bestaan.**

## 2.c Elektromagnetische golven

Tot nu toe hebben wij het over elektrische en over magnetische velden gehad alsof het aparte dingen zouden zijn. Maar de Deense natuurkundige Oerstedt ontdekte in 1820 bij toeval dat een stroomvoerende draad een magnetisch veld opwekt rond de draad.

### Experiment:



Probeer het bestaan van zo een magnetisch veld rond een stroomvoerende draad aan te tonen door ijzervijlsel op een kaartje aan te brengen rond de draad. Prik de draad door een gaatje in het kartonnetje. Zorg ervoor dat je een sterke gelijkstroom door de draad kan jagen. Richt het ijzervijlsel zich volgens de veldlijnen van het opgewekte magnetisch veld?

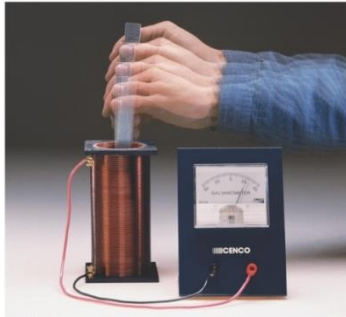
Je kan het opgewekte magnetisch veld ook waarnemen door kleine kompasjes rond de draad te zetten en te kijken hoe de naalden zich richten.



Bovenstaande toont een verband tussen het veranderend elektrisch veld van een stroomvoerende draad en het daardoor opgewekte magnetisch veld. Maar kan ook het omgekeerde? Veroorzaakt een veranderend magnetisch veld ook een elektrisch veld?

Het was de Britse natuurkundige Michael Faraday die in 1831 pre“cies dat aantoonde: hoe een veranderend magnetisch veld een elektrisch veld kan opwekken en dus een lading kan doen bewegen.

### Experiment:



Ook dit experiment kan je echt uitvoeren. Vraag een gevoelige ampèremeter, een spoel en een magneet.

Hou de magneet stil in de spoel. Kan je nu een een stroom opwekken?

Beweeg nu de magneet op en neer in de spoel? Wek je nu een elektrisch veld en dus een stroom op?

**Een elektrisch veld dat met de tijd varieert,  
produceert een magnetisch veld en omgekeerd**  
(een magnetisch veld dat in de tijd varieert, wekt een elektrisch veld op)

Het was de Schotse natuurkundige James Maxwell die dit ontdekte: elektrische en magnetische velden *die met de tijd variëren* kunnen elkaar wederzijds opwekken en zo elkaars voortplanting veroorzaken in de ruimte.

Dus golven van *elektrische velden kunnen niet bestaan zonder dat er ook magnetische golven ontstaan* en omgekeerd.

**Het blijkt dat licht zelf een zich voortplantend elektromagnetische golf is.**

### Snelheid van voortplanting van elektromagnetische golven

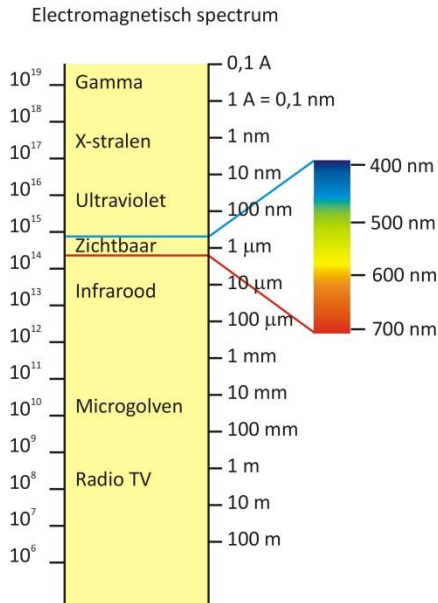
Newton veronderstelde dat de golven van het veranderende veld zich ogenblikkelijk en met oneindige snelheid voortplanten. Sinds Einsteins relativiteitstheorie weten we dat de voortplanting van een veld hoogstens met de **lichtsnelheid** kan gebeuren. De informatie dat een ster of een lading verandert van plaats wordt dus "gecommuniceerd" door het veld via de verandering van het veld en dit tegen een eindige snelheid nl. de lichtsnelheid ongeveer 300.000 km/s!

*Informatie over de verandering van een veld,  
kan getransporteerd worden van de ene plaats naar de andere  
via een **golf in dat veld.***

Deze vorm van informatieoverdracht via een veld, gebruik je dagelijks als je wifi gebruikt, als je met een gsm telefoneert of als je een radio aanzet.

### 3 Het elektromagnetisch spectrum

Het blijkt dat zichtbaar licht slechts een klein deel is van de mogelijke elektromagnetische golven die er bestaan.



Ook radiogolven en microgolven of golven waarmee je gsm en wifi communiceren..., dit zijn allemaal elektromagnetische golven.

Al deze golven zijn dus fysisch hetzelfde: het zijn elektromagnetische golven. Wat kan dan het verschil zijn tussen zichtbaar licht, radiogolven, microgolven en zo voort?

Kijk naar de figuur hiernaast, waar je alle elektromagnetische golven in een schema ziet.

Zie ook op

[http://www.molphys.leidenuniv.nl/monos/smo/index.html?basics/light\\_anim.htm](http://www.molphys.leidenuniv.nl/monos/smo/index.html?basics/light_anim.htm)

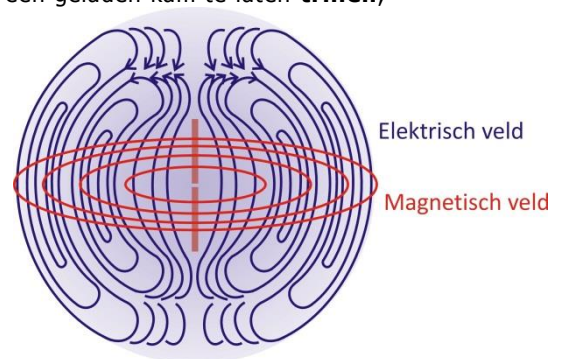
Rangschik volgende golven van korte golflengte naar lange:  
Zichtbaar licht, radiogolven, UV, gamma-stralen, microgolven

.....

We zitten dus altijd in een "bad" van elektromagnetische golven, waarvan wij de meeste golven dus niet kunnen zien of voelen. Onze detector, het oog is enkel gevoelig is voor elektromagnetische golven die zich in een bepaald interval van golflengtes bevinden. Die elektromagnetische golven, hebben we dan licht genoemd.

Elektromagnetische golven kan je opwekken door bv. een geladen kam te laten **trillen**, maar ook bijvoorbeeld met een **antenne**, waar ook **ladingen heen en weer** bewegen in een stuk metalen draad. Typisch zijn bv. ook de 50hz radiogolven die je overal vindt omdat we meestal continu omringd zijn door een 50Hz wisselstroom.

In de figuur hiernaast zie je een tekening hoe het elektrisch (blauw) en het magnetisch (rood) veld zich in 3 dimensies uitspreidt vanuit een antenne waarop een wisselstroom staat. De uitzending gebeurt in de ruimte.



*Figuur 20: Een elektromagnetische golf bestaat uit een trillend elektrisch veld en een loodrecht daarop met dezelfde periode trillend magnetisch veld. An electromagnetic wave is*

We weten dus nu wat er golft bij lichtgolven..

Wat golft er in het licht?

.....  
.....

Waarom kan het licht zich voortplanten in het vacuüm?

.....

#### 4 Het atoommodel van Rutherford zal inderdaad instorten

Je weet dat in het klassieke atoommodel van Rutherford het elektron als een planeet rond de kern cirkelt. Zoals je nu begrijpt, is het elektron een lading en een rondcirkelende lading versnelt eigenlijk met een kracht die naar het middelpunt gericht is. Maar een rondcirkelende lading kan je – zeker vanop een afstand gezien – zien als een gaande trilling. We weten dat trillende of versnellende ladingen een veranderend elektrisch veld veroorzaken. Dit veranderend elektrisch veld, veroorzaakt weer een veranderend magnetisch veld dat op zijn beurt weer een veranderend elektrisch veld opwekt. Op die manier moet het Rutherford-atoom dus elektromagnetische golven uitzenden!

Het Rutherford atoom-model zou dus altijd 'stralen'. Maar dit zou meteen het einde van het atoom betekenen, waarom?

.....



*An electron circling around the nucleus in an atom will continuously emit electromagnetic waves. (Figure source: EDN, March 2000)*

Dus het bestaan zelf van atomen kan niet verklaard worden door de klassieke fysica. Zoals je zal ontdekken in de volgende twee leerstations, is het enkel kwantumfysica dat het bestaan van atomen en moleculen kan verklaren, hoewel in een wat nieuwe betekenis.

#### 5 Concepten in Leerstation III

Vervolledig de ontbrekende concepten:

**Klassieke concepten**

Een golf is een ..... die zich voortplant.

Het begrip "veld". Elektrisch veld, magnetisch veld, zwaarteveld.

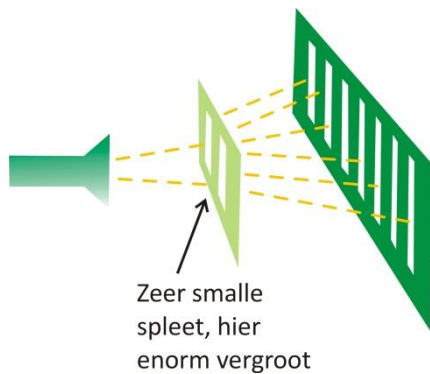
Licht is een zich voortplantend ..... golf.

**Kwantumconcepten**

*Geen!*

# Learning station IV: Deeltje-golf dualiteit – kwanta van velden

## 1 Golf deeltje dualiteit: fundamentele eigenschap van licht en materie



In de 19de eeuw werd duidelijk dat licht een golfverschijnsel is, een golf van **elektrische en magnetische velden**. Maar daarmee bleek het laatste woord over de ware aard van licht nog niet gezegd.

Laten we eens terug kijken naar het dubbelspleet experiment voor licht.

Wat verwacht je te zien op het scherm als licht deeltjes zouden zijn? .....

Wat verwacht je te zien op het scherm als licht golven zouden zijn? .....

Het licht komt **niet** toe als **deeltjes** (wat 2 banden zou opleveren) en **ook niet als golven** (wat een interferentiepatroon zou opleveren dat wegdeemstert): het interferentiepatroon wordt immers opgebouwd deeltje per deeltje. **Het lijkt wel of de lichtdeeltjes afspreken hoe ze zullen toekomen:** in een interferentiepatroon van golven. Het licht lijkt dus iets van een deeltje en een golf tegelijk te hebben.

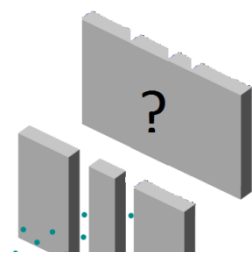
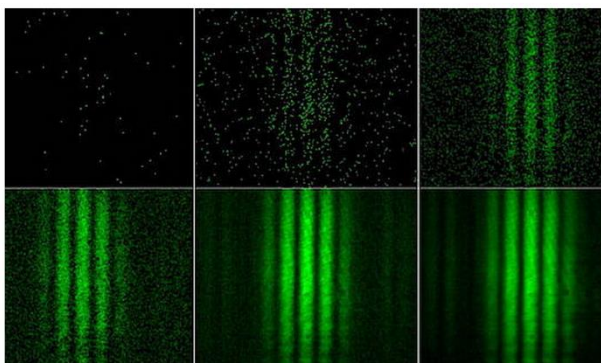


Figure 23 *Licht in een dubbelspleetexperiment: het komt toe als individuele fotonen maar ze tellen op tot een interferentiepatroon dat gewoonlijk golven veroorzaken. (Recording by A. Weis, University of Fribourg)*

Hetzelfde gedrag vertonen elektronen, neutronen maar ook hele molecules!

Kunnen we elektronen of licht in een dubbelspleetexperiment opvatten als bestaande uit louter deeltjes? (JA/NEE)

Kan je de resultaten van het dubbelspleetexperiment met elektronen vergelijken met het resultaat van hetzelfde experiment maar dan met licht? Is dit vergelijkbaar of niet?

.....

We dachten aanvankelijk dat materie tenminste materie-achtig zou zijn, dus uit deeltjes zou bestaan. Maar zelfs kleine materiedeeltjes komen niet aan in aparte banden achter de openingen zoals balletjes dat horen te doen. Ze bouwen een interferentiepatroon op zoals golven. Materie blijkt dus een golfkarakter te hebben!

Fysici noemen dit onvoorstelbare probleem de **dualiteit deeltje-golf**. De vreemde aard van licht strookt niet met de klassieke opvatting deeltje óf golf.

### Dualiteit golf-deeltje: een fundamenteel beginsel voor licht én materie

In de natuur bestaat er blijkbaar een soort symmetrie tussen licht en materie.

**Elektronen en fotonen in een 2-spletenexperiment komen *de ene na de andere toe* maar het patroon gevormd door deze deeltjes is een interferentiepatroon veroorzaakt door het golfkarakter van deze deeltjes!**

Deze dualiteit zowel van golven als van deeltjes blijkt een fundamenteel gegeven te zijn in de natuur. Het is een fundamenteel beginsel in de kwantumfysica dat een volkomen nieuw inzicht introduceert over de natuur.



Hier wordt getoond hoe een foto in feite opgebouwd wordt foton na foton (Source: Rose, A (1973) Vision: human and electronic. Plenum Press)

Uit het dubbelspleet experiment voor licht met lage intensiteit blijkt het dat **licht** golf en ..... eigenschappen aantoont.

Uit het dubbelspleet experiment voor elektronen blijkt het dat **elektronen** deeltjes en ..... eigenschappen aantonen.

Het deeltjesmodel en het golfmodel zijn complementair en de werkelijkheid is complexer dan wat één van de twee modellen kan beschrijven. We spreken over een **deeltje-golfdualiteit**. Een fundamenteel beginsel in de kwantummechanica. Dualiteit is een beginsel geldig in de moderne fysica dat niet geldig is in de klassieke fysica.

## 2 Kwantumtheorie van licht en materie

Einstein veronderstelde dat de **energie van licht** enkel uitgewisseld kan worden in discrete pakketjes of "kwanta". Dus niet continu zoals je van golven verwacht. Met andere woorden: de energie van het elektromagnetisch veld kan niet continu variëren, maar kan enkel veranderen met **discrete sprongen, kwanta van energie** genoemd. De energiekwanta (je kan ze 'deeltjes' noemen als je wil) van het elektromagnetisch veld worden fotonen genoemd.

### 2.a Elektromagnetische golven en energiekwanta: fotonen

Het was de Duitse fysicus Max Planck die het precieze verband tussen de energie van een foton (deeltjeseigenschap) en de frequentie van de lichtgolf (golfeigenschap) ontdekte. Het is in volgende relatie, de relatie van Planck-Einstein, dat men de grootte van het energiepakket van het elektro-magnetisch veld kan afleiden uit de frequentie van het veld:

$E = h \cdot f \qquad (1.)$
-----------------------------

waarin h een hele kleine maar fundamentele **natuurconstante** is die de fijne korreligheid van de lichtkwanta aangeeft:

de waarde van de **constante van Planck**  $h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$

**Voorbeeld**

- a) Bereken de waarde van het kleinste energiekwantum van licht, het foton dus, voor geel licht dat een frequentie heeft van  $f = 5 \times 10^{14} \text{ Hz}$

E = .....

Dit is het kleinste energiekwantum van geel licht.

- b) Bereken de energie van 3 fotonen van dit geel licht:

E = .....

De energie van geel licht kan dus niet gelijk welke willekeurige waarde aannemen maar de energie van dit geel licht is telkens een (geheel/niet geheel) veelvoud van de fotonenergie die je hierboven in a) berekende. **De energie van licht is dus niet continu variabel maar is gekwantiseerd.**

Maar omdat licht bestaat uit een trillend elektromagnetisch veld, besluiten we dus dat de **energie van het elektromagnetisch veld gekwantiseerd** is. Het kan slechts in pakketjes foton per foton worden afgegeven.

**Experiment:** in de hands-on experimenten die horen bij deze leerstations is er een experiment waar je door het meten van de verschillende spanning waarop rode, groene en blauwe LEDs aangaan en het bepalen van de golflengte van het uitgezonden licht, de grootte van de energiekwanta en dus de constante van Planck kan bepalen.

**Technologie:** Het gegeven dat licht wordt gedetecteerd kwantum per kwantum wordt toegepast in elke digitale camera. In leerstation iV kan je over deze CCD-technologie meer vernemen.

## 2.b Materiegolven en kwanta

Ok, de lichtdeeltjes die we zien zijn in feite discrete energiepakketjes van het elektromagnetisch veld. Maar gaat de symmetrie tussen licht en materie zover dat ook materiedeeltjes zoals elektronen, protonen, neutronen en zelfs hele moleculen, ook kunnen gezien worden als kwanta van een veld? Met andere woorden bestaat er een materieveld waarvan materiedeeltjes kwanta zijn?



Jaren voor het uitvoeren van het dubbelspleet experiment voor elektronen had de Franse natuurkundige **Louis De Broglie** de *golfeigenschappen* van de materie reeds voorspeld. Louis De Broglie geloofde immers in de symmetrie van de natuur. Als de elektromagnetische golf energiekwanta heeft (wat wij als fotonen waarnemen) dan moest ook het omgekeerde gelden: materiedeeltjes die we waarnemen zouden ook de energiekwanta kunnen zijn van een tot nog toe niet beschouwde golf.

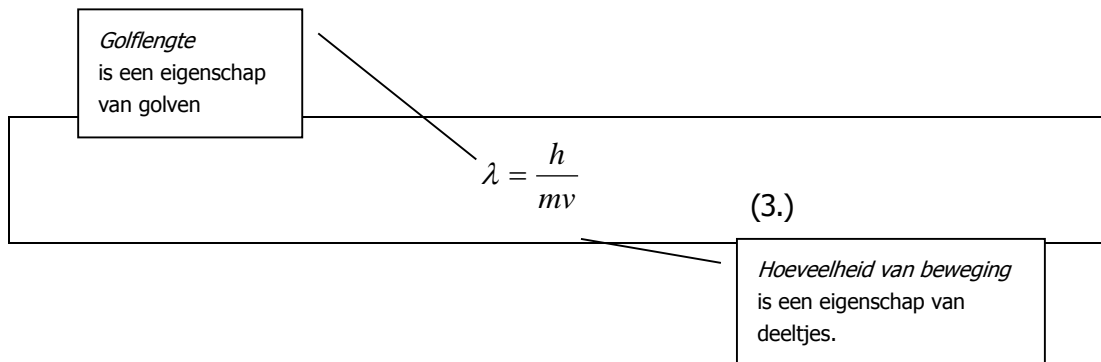
Hij noemde de golf waarvan de materiedeeltjes kwanta zouden zijn een **materiegolf**. Het bestaan van zo een materiegolf wordt nu de **hypothese van De Broglie** genoemd. De Broglie wist voor dit tot dan toe onbekend materieveld een precieze uitdrukking op te schrijven.

In deze uitdrukking legt De Broglie een verband tussen enerzijds de hoeveelheid van beweging

$$p = mv \quad (2.)$$

wat we kennen als een **deeltjeseigenschap** (bv. een vrachtwagen tegen lage snelheid kan evenveel of zelfs meer hoeveelheid van beweging hebben dan een 2pk'tje met een hoge snelheid).

Een anderzijds de golflengte die een typische **golfeigenschap** is:



Merk je op dat in de relatie van De Broglie de golf- en deeltjeseigenschappen precies met elkaar zijn verbonden door de constante van Planck die hier optreedt als een constante van omgekeerde evenredigheid?

**De golflengte van een (kwantum van) materie is omgekeerd evenredig tot zijn hoeveelheid van beweging**

Deeltjes met een grote hoeveelheid van beweging hebben bijgevolg een (KORTE/LANGE) golflengte.

Voor een elektron geldt dus volgens De Broglie:  $p = h / \lambda$ , waar  $p$  ..... is van het elektron en  $\lambda$  de golflengte van de ..... die men aan het elektron kan toekennen.

### Oefening

Hoe komt het nu dat we de **golflengte van een elektron wel kunnen waarnemen** (bv. in het dubbelspleetexperiment) en de **golflengte van een bal niet?** Laten we de golflengtes van beide materiedeeltjes berekenen met de hypothese van De Broglie.

- a) Wat is de De Broglie golflengte van een elektron die met snelheid  $v = 6 \times 10^6 \text{ m/s}$  beweegt?

(Je hebt de massa van het elektron nodig. Ga hem opzoeken!)  $m_e = \dots\dots\dots \text{ kg}$

$\lambda = \dots\dots\dots$

- b) Wat is de De Broglie golflengte van een bal met massa  $m = 0,2 \text{ kg}$  en snelheid  $v = 15 \text{ m/s}$ ?

$\lambda = \dots\dots\dots$

- c) Vergelijk de twee golflengtes die je berekend hebt met de golflengte van het licht (kijk eventueel terug naar het spectrum van licht leerstation VI):

De golflengte van het licht is tussen .....

De golflengte van de gewone bal is ..... dan de golflengte van licht.

De golflengte van het elektron is ..... dan de golflengte van licht.

- d) Kan je een reden bedenken voor het feit dat we het golfkarakter van de gewone bal niet kunnen waarnemen (ook niet met de meeste moderne technologie in een labo)?

.....

*Maar wat voor een golf is een materiegolf toch waarvan het elektron een kwantum is?*

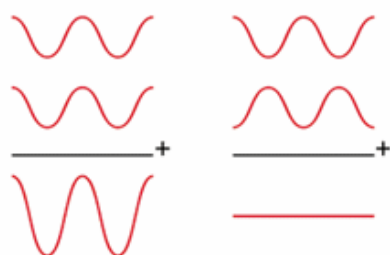
## 3 Kwantumvelden

### 3.a De golfintensiteit geeft de waarschijnlijkheid om kwanta te detecteren

Laten we terug kijken naar het dubbelspleetexperiment maar nu met de hypothese van De Broglie die een veld verbindt zelfs met materie!

Hoe kunnen we het ontstaan van het interferentiepatroon verklaren bij het dubbelspleetexperiment? Wel, als we de hypothese van De Broglie aannemen en we veronderstellen dat er een materieveld is, dan kan dit veld door de 2 spleten tegelijk gaan. Dit veld kan dan zoals golven die door de 2 spleten gaan, interfereren met zichzelf. Het is

de superpositie van beide golven (elk afkomstig van elk van de 2 spleten) dat verantwoordelijk is voor het ontstaan van het interferentiepatroon van maxima en minima.



We weten al dat maxima ontstaan op plaatsen waar het weglengteverschil zodanig is dat de golf afkomstig van de ene spleet in fase is met die afkomstig van de andere spleet (constructieve interferentie). Op andere plaatsen is het weglengteverschil zijn de twee golven in tegenfase zodat daar destructieve interferentie optreedt.



Figure 24 De golven van het materieveld passeren de 2 spleten en interfereren constructief of destructief naargelang het weglengteverschil. Waar nu de amplitude van dit gesuperponeerde veld groot is, is er een **grote kans** dat er een **energiepakket** of **kwantum** kan afgegeven worden door het veld.

Maar hoe komen er nu deeltjes als het over maxima en minima van golven gaat? Wel het is de amplitude van de resulterende golven die bepaalt wat de kans is dat er daar een energiepakket of kwantum kan afgegeven worden. Op plaatsen waar de netto-amplitude van het veld groot is (bv. waar de maxima zijn), is er een grote kans dat er een kwantum uit het veld ontstaat. Dus in geval van een 2-spleten experiment van elektronen, is het op de plaatsen waar deze maxima vallen, dat er een hoge kans is dat je een elektron, een 'deeltje' zal waarnemen.

### De intensiteit van het veld geeft de waarschijnlijkheid dat men er een energiekwantum van het veld kan detecteren.

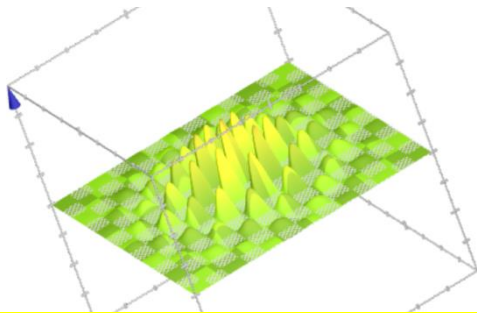
*Dit fundamentele principe van waarschijnlijkheid verklaart waarom energiepakketten zo willekeurig ontstaan in het 2-spletenexperiment. Het is niet mogelijk om de precieze plaats waar een deeltje zal verschijnen te voorspellen omdat een deeltje geen precieze plaats heeft. Het is wel mogelijk om de kans te geven op de verschillende plaatsen dat een deeltje kan waargenomen worden. Deze kans neemt toe op de plaatsen waar de maxima zijn en neemt af op de plaatsen van de minima.*

Het is de Duitse natuurkundige Max Born die met deze waarschijnlijkheidsinterpretatie van de De Broglie golven op de proppen kwam. Het klonk allemaal erg 'spooky' en andere fysici zoals Einstein, konden zich niet vinden in een fysica die geen precieze deterministische voorspellingen kon doen. Hoewel het laatste woord daarover nog niet gezegd is, ziet het er toch meer en meer naar uit dat indeterminisme, zeker op kleine schaal, inherent is aan de natuur.

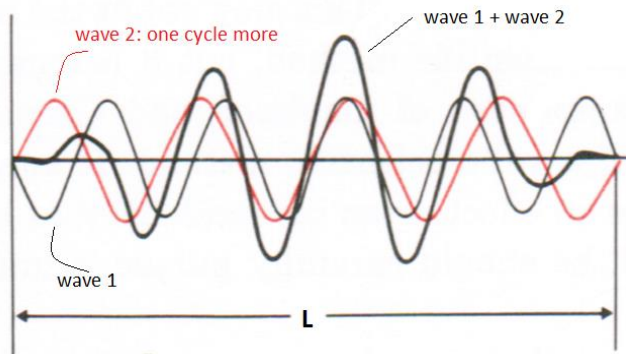
Ook als we het 2-spleten experiment voor licht beschouwen, geldt hetzelfde: het elektromagnetisch veld gaat door de 2 spleten en interfereert constructief of destructief. Fotonen ontstaan nu met veel kans op plaatsen waar de maxima optreden en minder vaak op plaatsen rond de minima.

### 3.b Een deeltje als een golfpakket

Een gevolg van het golfkarakter van materie is dat – in tegenstelling hoe we klassiek over deeltjes denken - deeltjes niet volledig in de ruimte gelokaliseerd zijn. In de Newtoniaanse mechanica hebben deeltjes een precieze snelheid en positie. Maar wegens het golfkarakter dat materie ook heeft, is de plaats en de snelheid van deeltjes uitgesmeerd en dus binnen zekere grenzen 'onbepaald'.



In kwantumfysica denk je best over deeltjes in termen van een 'golfpakket' zoals je dat in bijgaande figuur kan zien. Een golfpakket bestaat uit een som van verschillende golven die constructief superponeren in een bepaald gebied. Verder weg tellen de verschillende golven op met als maar meer verschillende fases waardoor de golven destructief bij elkaar optellen. In de waarschijnlijkheidsinterpretatie van Max Born betekent dit dat het deeltje slechts in een beperkt gebied kan bestaan. In een gebied dus en niet op één bepaalde plaats. Er is een onbepaaldheid op de plaats.



Kijk naar dit voorbeeld: twee golven tellen op tot een 3de golf. Deze 3de golf is precies het golfpakket. We beperken hier het 'zicht' tot 2 dimensies.

Zie je hoe de amplitude maximaal is (in het MIDDEN/ aan de ZIJKANT) van het golfpakket. Zie je hoe de amplitude wegdeemstert op de

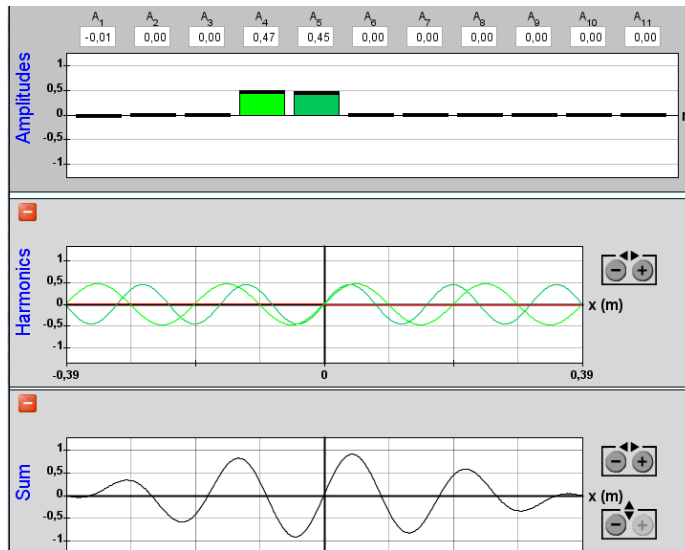
hoeken?

Dit bereiken we al met het optellen van slechts 2 golven met dezelfde amplitude: golf 1 heeft een golflengte die 4 keer in de lengte L gaat. Golf 2 heeft een cyclus meer en gaat dus ..... keer in de lengte L. Zie je hoe de 2 golven (constructief/destructief) interfereren op de 2 hoeken? Hoe ze in het midden (constructief/destructief) interfereren?

#### Onderzoek met Phet applet

Je kan verder onderzoeken hoe golven kunnen optellen tot een golfpakket met de Phet applet 'Fourier': <https://phet.colorado.edu/en/simulation/fourier>

Probeer de bovenstaande situatie te bekomen met 2 golven die één cyclus van elkaar verschillen over de lengte L.



Welke golven koos je?  
 Aantal cycli van golf 1: .....  
 Aantal cycli van golf 2: .....  
 Laten we nu het 'deeltje' sterker gelocaliseerd maken. Kan je dat niet doen door meer golven toe te voegen bij de optelling?

Door meer golven op te tellen met lichtjes verschillend aantal cycli, ontstaat er meer (constructieve/destructieve) interferentie verder weg. Alleen in het midden tellen de golven (constructief/destructief) op.

In het midden blijft dus de grootste amplitude en dus kans op detectie van een deeltje. Maar, er is nog steeds ook een zekere waarschijnlijkheid om het deeltje buiten het centrum van het golfpakket te detecteren omdat daar de som van de golven niet helemaal nul is. Kunnen we dus met zekerheid zeggen waar het deeltje is?

.....

In feite is de plaats van ons deeltje dus onbepaald. Kan je een grootte van de onbepaaldheid of onzekerheid aangeven voor de positie van ons golfpakket?

.....

Voor we het deeltje detecteren, zegt men dat het deeltje in een 'superpositie van toestanden' is. Inderdaad: de golf die het deeltje beschrijft is een som, een superpositie van golven, van toestanden.

Bijvoorbeeld ook bij het 2-spletenexperiment is het deeltje, voor we het detecteren in een superpositie van golf-toestanden: de positie van het deeltje voor de waarneming is onbepaald: we weten niet door welke spleet het gegaan is. Pas als het waargenomen wordt op het scherm, 'verschijnt' het deeltje in een precieze positie. Bij waarneming valt de superpositie van golf-toestanden weg. : het deeltje wordt op een welbepaalde plaats waargenomen als gevolg van een meting.

Deze intrinsieke onbepaaldheid van een deeltje, die het gevolg is van het golfkarakter, en de plotse opheffing van deze onbepaaldheid bij detectie, geeft tot op vandaag aanleiding tot het interpretatieprobleem van de kwantumfysica: bestaat het deeltje eigenlijk voor de waarneming? Fysici noch filosofen zijn het hierover eens.

### 3.c De Heisenberg onbepaaldheidsrelatie

#### i) Onbepaaldheid in positie en momentum van een deeltje

Ok, we nemen aan dat een deeltje niet volledig gelocaliseerd is vooraleer het gedetecteerd wordt. Er is geen manier om de voorspellen 'waar het deeltje precies is', zoals we dat gewoon zijn in de klassieke fysica omdat een deeltje gewoon niet volledig bepaald is. Als het deeltje geen precieze plaats heeft, kunnen we ook geen precieze snelheid bepalen zoals we dat gewoon zijn in de Newtoniaanse mechanica. Er blijkt een zeker trade-off te bestaan: hoe meer je de positie kan bepalen, hoe minder je weet over de snelheid van het 'deeltje'.

Het was de Duitse natuurkundige Werner Heisenberg die de precieze onbepaaldheidsrelaties kon geven: het zijn onbepaaldheidsrelaties die de trade-off laten zien tussen de onbepaaldheid op de plaats en het lineair momentum. (Lineair momentum of hoeveelheid van beweging is het product van de massa van een voorwerp met zijn snelheid.

Let op de onbepaaldheid waarover we hier spreken heeft niets te maken met meetonnauwkeurigheden of rekenaf rondingen: het is gewoon een intrinsieke eigenschap van alle deeltjes in de natuur! Je kan de precieze positie niet bepalen want ze hebben geen precieze positie!

#### Redenering voor het golfpakket gevormd door 2 golven die één cyclus van elkaar verschillen

Laten we tonen hoe de superpositie van 2 golven die één cyclus van elkaar verschillen, leidt tot een onbepaaldheid van het deeltje dat voorgesteld wordt door dit golfpakket.

Als ons golfpakket een lengte L heeft, dan is het aantal cycli de lengte gedeeld door de golflengte:

$$\frac{L}{\lambda} = \text{number of cycles in length } L$$

Omdat in ons voorbeeld het verschil in cycli 1 is, kunnen we dit verschil schrijven als

$$\text{aantal cycli van golf 2 in lengte } L - \text{naantal cycli van golf 1 in lengte } L = \dots \dots \dots ?$$

Of in symbolen:

$$\frac{L}{\lambda_2} - \frac{L}{\lambda_1} = \dots$$

Breng nu de De Broglie relatie in: .....

En vervang  $\frac{1}{\lambda_n}$  door  $\frac{p}{h}$

Dan krijgen we:

$$\frac{Lp_2}{h} - \frac{Lp_1}{h} = \dots \dots$$

Of:

$$L(p_2 - p_1) = \dots \dots$$

Kijk nu opnieuw naar het voorbeeld hierboven. L is daar de onbepaaldheid van het golfpakket (of 'deeltje' als je wil). Deze onbepaaldheid wordt vaak genoteerd als Δx.

Maar ( $p_2 - p_1$ ) is de onbepaaldheid op het momentum (massa maal snelheid) van het deeltje, meestal genoteerd als  $\Delta p$ . Deze uitdrukking zal dus inderdaad de mogelijke waarden geven dat het momentum van het golfpakket kan hebben.

We krijgen dus volgende onbepaaldheidsrelatie (kijk na of je onderstaande relatie uitgekomen bent):

$$\Delta x \cdot \Delta p = h$$

In ons particulier voorbeeld van de superpositie van 2 golven, komen we dus een golfpakket uit dat uitgesmeerd is over lengte  $L$  (of  $\Delta x$ ). Wegens de De Broglie relatie wordt de golf verbonden aan een momentum  $p$  van het deeltje, en dit betekent noodzakelijk een ook een onbepaaldheid  $\Delta p$  op het momentum. Bijgevolg is the produkt van de onbepaaldheden  $h$  in dit geval.  $h$  is de kleinst mogelijke waarde voor het geval dat je 2 golven optelt. Bijgevolg moeten we in onze onbepaaldheidsrelatie "≥" schrijven

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq h$$

### Algemene onbepaaldheidsrelatie

Een meer algemene redenering dan bovenstgaande, leidt ertoe dat het product van de onbepaaldheid op de plaats en de onbepaaldheid op het momentum van een deeltje groter moet zijn dan  $h/4\pi$

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq h/4\pi$$

Dit is de beroemde **Heisenberg onbepaaldheidsrelatie**.

Je kan de positie en momentum van een deeltje niet willekeurig nauwkeurig bepalen, wegens een intrinsieke onbepaaldheid, trade-off tussen beide.

Tot de komst van de kwantumfysica leek de wereld te bestaan uit deeltjes wiens positie en momentum je in principe precies moest kunnen bepalen. Kwantumfysica bracht ons het inzicht dat de natuur onbepaaldheden heeft ingebouwd, trade-offs tussen grootheden. Zoals gezegd zijn de fysische en filosofische interpretaties hiervan voor de fysica en voor ons wereldbeeld nog niet volledig duidelijk.

### Oefening:

Laten we de onbepaaldheid berekenen voor de snelheid van een electron dat is gebonden aan een atoom met een diameter van  $10^{-10}$  m

.....  
(Answer:  $\Delta v \geq 10^6$  m/s !)

Zoals je kan zien is de vraag: 'Wat is de snelheid van een elektron in een atoom vrij zinloos als de snelheid zo onbepaald is! Deze eenvoudige berekening toont nogmaals hoe ver van de natuur het klassieke Rutherford atoommodel is geworden: het heeft geen zin het elektron voor te stellen als een 'planeetje' dat rond de kern draait!

### ii) Onbepaaldheid inzake de energie en tijd van een deeltje

Er is ook een onbepaaldheids-trade-off tussen de energie en de tijd.

Ook dit is een gevolg van het golfkarakter van deeltjes. Je kan dit vergelijken met de situatie waarbij je de frequentie van een toon wil bepalen. Als je dat wil doen, moet je een voldoende lange tijd naar de toon luisteren, of de toon opmeten. Er is dus ergens een relatie

$$\Delta f \cdot \Delta t \geq \text{een of andere waarde}$$

Ok, deze onbepaaldheid geldt dus ook in de klassieke fysica van tonen en muziek. Je kan de frequentie van een golf niet bepalen als je niet minstens voor één cyclus de golf van de toon opmeet of beluister. Als we de onbepaaldheid van één cyclus noteren als  $\Delta t = T$  en omdat  $\Delta f = 1/T$  zal de 'een of andere waarde' gelijk worden aan 1! Dus:

$$\Delta f \cdot \Delta t \geq 1$$

Nu, sinds deeltjes in kwantumfysica ook een golfkarakter hebben en de frequentie ook verbonden is met de energie via de Einstein-Planck relatie  $E = h \cdot f$ , krijgen we het volgende resultaat door  $f$  te vervangen door  $E/h$

$$\frac{\Delta E}{h} \cdot \Delta t \geq 1$$

Op die manier krijgen we de onbepaaldheidsrelatie tussen energie en tijd:

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq h$$

De exacte vorm is in dit geval:

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq h/2\pi$$

Dus, de energie van een deeltje is alleen bepaald binnen de grenzen van een zeker tijdsinterval. Je kan niet spreken van een zekere energie van een deeltje op gegeven ogenblik zoals wel het geval is in de klassieke fysica.

## 4 Kwantumveldentheorie (Quantum Field Theory)

We zagen eerder hoe wetenschappers de idee van 'kracht op afstand' vreemd vonden en – om dit concreet te maken – het begrip veld introduceerden. De klassieke velden, zoals het **elektromagnetisch** en het **gravitatieveld**, zijn in die zin "bemiddelaars" van krachten (of eigenlijk van energie). In de kwantumtheorie zijn de golven (die men ook als een veld kan beschouwen) dragers van energie.

Kwantumvelden zijn, zoals klassieke velden, gedefinieerd in alle punten van de ruimte. Ze kunnen variëren met de tijd als een golf en in deze manier kunnen ze zich voortplanten.



Zo kan er een **foton** ontstaan als kwantum van het **elektromagnetisch veld**. Maar ook de materie zelf, zoals **elektronen** en **protonen** zijn kwanta van **materievelden**. Bv. Alle deeltjes die gemeten worden in deeltjesversnellers zoals het CERN in Genève, worden voorspeld door Kwantumveldentheorie (Quantum Field Theory).

In de moderne kijk van kwantumveldentheorie worden zelfs krachten (op afstand weet je nog) gezien als het resultaat van de uitwisseling van kwanta tussen velden. In de experimenten in CERN bv. wordt de theorie van de materie en de krachtbosonen (eigenlijk ijkbosonen genoemd) geverifieerd in experimenten.

Maar er blijven onopgeloste problemen bestaan in kwantumveldentheorie. Een hardnekkig probleem is dat het oudste veld dat we kennen: het gravitatieveld (voorlopig) niet kan begrepen worden als kwantumveld. Gravitatie wordt bv. in Einsteins relativiteitstheorie behandeld als een klassiek veld. Fysici zoeken al quasi 100 jaar naar een kwantumtheorie van gravitatie. Iedereen hoopt dat de experimentele verificatie van het Brout-Englert-Higgs veld met het gelijknamige boson, nieuwe hoop kan geven in dit onderzoeksgebied. Manifeste fenomenen zoals donkere materie en donkere energie blijven voorlopig ook onbegrepen en zijn misschien verbonden met ons slechts klassiek begrip over gravitatie.



Figure 25 De Belg François Englert en de Schot Peter Higgs in CERN na de experimentele bevestiging van het Brout-Englert-Higgs boson in juli 2012. Beide fysici ontvingen de nobelprijs voor fysica in December 2013, voor de voorspelling van het kwantum van het BEH-veld. Een voorspelling die ze al gemaakt hadden in de vroege 60'er jaren van de 20<sup>ste</sup> eeuw. (Bron: CERN, Genève)

## 5 Concepten in Leerstation IV

Vervolledig de ontbrekende concepten:

### Klassieke concepten

De hoeveelheid van beweging is een klassieke eigenschap van .....

Golflengte is een klassieke eigenschap van .....

Het begrip veld als "bemiddelaar" van krachten.

Positie en snelheid van deeltjes zijn .....

### Kwantumconcepten

De lichtenergie van het elektromagnetisch veld kan slechts in *discrete hoeveelheden* afgegeven worden. M.a.w. de energie van licht kan niet continu variëren maar slechts in .....

Licht heeft golf-deeltje eigenschappen.

..... **dualiteit** is een fundamenteel beginsel van licht en materie.

De energie van het elektromagnetisch veld is gekwantiseerd. De grootte van de energiepakketten van het elektro-magnetisch veld (..... genoemd) kan bepaald worden aan de hand van de uitdrukking van Planck-Einstein:  $E=h \cdot f$ , waar  $f$  de .....van de ..... is.

De hypothese van De Broglie legt het verband tussen deeltjes- en golfkarakter van materie:  $\lambda = h/mv$ , waar  $\lambda$  de .....van de materiegolf is en  $mv$  de ..... van het materie deeltje is.

Kwantumvelden: kunnen energie afgeven alleen maar in **discrete energie.....of "kwanta"**.

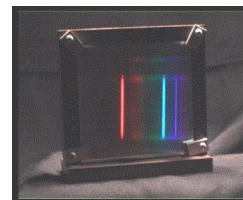
Een foton kan ontstaan als kwantum van het ..... **veld**.

Materie zelf, zoals elektronen en protonen, zijn kwanta van trillende .....**velden**.

De netto-amplitude van de interfererende golven is een maat voor de ..... dat er een energiepakket (kwantum) afgegeven wordt door het (materie- of elektromagnetisch) veld.

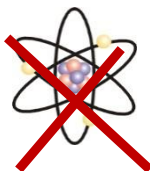
Eigenschappen van deeltjes, zoals positie en snelheid, zijn intrinsiek .....

# Learning station V: De emissielijnen van waterstof verklaard met kwantummechanica

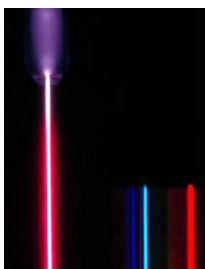


## 1 Discrete emissiespectra van elementen verklaard?

### 1.a Emissielijnen van elementen: klassiek niet begrepen



Atomen kunnen licht uitstralen en daarbij stellen we vast dat het spectrum heel precieze discrete emissielijnen bevat. Dit wonderlijke fenomeen kan *niet* verklaard worden met het atoommodel van de klassieke fysica (Rutherford). **De klassieke fysica weet *niet* hoe licht uit atomen kan komen**, nog minder hoe al deze fijne discrete kleurlijnen kunnen optreden. Deze probleemstelling brengt ons terug bij het eerste leerstation.



Nu we heel precies weten welke eigenschappen licht heeft en welk type golf het is, kunnen we verder zoeken naar de oplossing van het probleem.

**Niels Bohr** en **Louis De Broglie** waren de eersten die het atoommodel van Rutherford herdachten en een **kwantum model van het atoom** opstelden. Dankzij die nieuwe visie op de bouw van het atoom konden heel wat fysische en chemische eigenschappen die we waarnemen, beter verklaard worden.

De fijne emissielijntjes van bv. waterstof of helium (en alle andere elementen) tonen ons een glimp van de kwantum uitwisselingen tussen materie en licht in het atoom. Het door atomen uitgezonden licht bestaat uit precieze kleurenlijnen. In leerstation I heb je de mooie emissielijnen van enkele elementen kunnen zien en heb je ervan de precieze golflengte opgemeten.

### 1.b Kwantumvelden van materie en licht

Het 2-spleten experiment toont ons dat materiedeeltjes niet zomaar deeltjes kunnen zijn (hoe zouden ze dan door 2 spleten kunnen gaan?) en lichtgolven niet zomaar golven (ze komen foton per foton toe). Een belangrijk kenmerk van kwantumtheorie is dat licht én materie *deeltje-golf dualiteit* vertonen.

Hoe kan men zich die deeltje-golf dualiteit voorstellen? Materie-'deeltjes', zoals het elektron, kan men in de kwantumveldentheorie opvatten als **kwanta van een veld, van een materieveld** (het bestaan van zo een veld is precies de hypothese van De Broglie). Ze ontstaan uit dit veld. Deeltjes van licht - fotonen - zijn de **kwanta van het elektromagnetisch veld**. Lichtdeeltjes ontstaan uit het elektromagnetisch veld.

De dualiteit betekent ook dat we een golflengte nl. de golflengte van de (materie)golf, moeten kunnen toekennen aan een elektron. Het is precies de kwantitatieve relatie van De Broglie die dat kan. Schrijf hieronder terug de hypothese van De Broglie

$$\lambda = \dots\dots\dots$$

Zoals je ziet, moet je wel de hoeveelheid van beweging p van het elektron dan kennen. We weten dat p klassiek gelijk is aan ..... En dat blijft ook zo in kwantumtheorie.

De centrale vraag van dit leerstation is:

**Als wij het elektron van het waterstofatoom  
als een golf beschrijven met de golflengte van De Broglie,  
kunnen we dan de discrete emissielijnen van het waterstofatoom verklaren?**

In dit leerstation zullen we, met het kwantum atoommodel van De Broglie, erin slagen om:

(a) de discrete emissielijnen *kwalitatief* te verklaren,

(b) de discrete emissielijnen van het waterstofatoom ook *kwantitatief* te voorspellen.

Dat betekent dat we niet alleen een model kunnen maken waarmee we gaan *verklaren* waarom er discrete emissielijnen ontstaan. Maar met dat model kunnen we de precieze **frequenties** van de emissielijnen uitgezonden door het waterstofatoom berekenen. We gaan de resultaten van ons kwantumfysisch model kunnen vergelijken met de gemeten waarden!

Omdat wij van plan zijn om kwantitatieve voorspellingen te maken met ons model, is het nuttig om eerst eventjes terug te kijken naar de gemeten frequenties van de emissielijnen van het waterstofatoom. Ze volgen een merkwaardig patroon van gehele getallen. Het is dit merkwaardig patroon dat Louis De Broglie tot zijn kwantum atoommodel inspireerde.

## 2 De enigmatische formule van Balmer

### 2.a Opnieuw de gehele getallen van Pythagoras in de natuur

De Zwitserse wiskunde leraar Johann Jakob Balmer was **ge fascineerd door gehele getallen** achter natuurverschijnselen (een beetje zoals **Pythagoras** dat 2500 jaar eerder was). Hij onderzocht ook de discrete emissielijnen van de elementen en vond in 1885 een eenvoudige formule om het lijnenspectrum van waterstof te verklaren. Zijn formule was *een eenvoudig spel met gehele getallen*.

De Balmer formule luidt:

$$f_{n_2 \rightarrow n_1} = cR \left( \frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right)$$

Hierin zijn c de lichtsnelheid en R een experimenteel bepaalde constante

$$R = 1,0974 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$$

Door gehele getallen in te vullen, kwam uit de formule de precieze frequenties van de emissielijnen van het waterstofatoom! Een fantastische prestatie, maar Balmer wist niet waarom de emissielijnen beschreven werden door zijn mystieke formule, maar het klopte! Toch had hij een zeer belangrijke ding begrepen: discrete emissielijnen hebben iets te

maken met reeksen van gehele getallen! De kwantumtheorie zou later verklaren waar deze gehele getallen vandaan kwamen. En net zoals 2500 jaar eerder had het iets met **muziek** te maken!

## 2.b De formule van Balmer en het spectrum van waterstof

Afgezien van de constante factor  $c \cdot R$  treden 2 natuurlijke getallen op in de formule:  $n_1$  en  $n_2$ . Als je bv.  $n_1 = 2$  neemt en telkens  $n_2$  laat variëren  $n_2 = 3, 4, 5, 6$  dan vind je precies de frequenties van de kleuren van de waterstoflijnen!,  $n_2 > n_1$ ,

Laten we controleren of de formule van Balmer klopt:

Als je  $n_2 = 3$  en  $n_1 = 2$  kiest, wat krijg je voor de waarde van de frequentie  $f$ ? (Rond af naar 3 beduidende cijfers).

Rode lijn:  $f_{3 \rightarrow 2} = \dots$

En als je  $n_2 = 4$  en  $n_1 = 2$  kiest?

Blauwgroene (turkoois) lijn:  $f_{4 \rightarrow 2} = \dots$

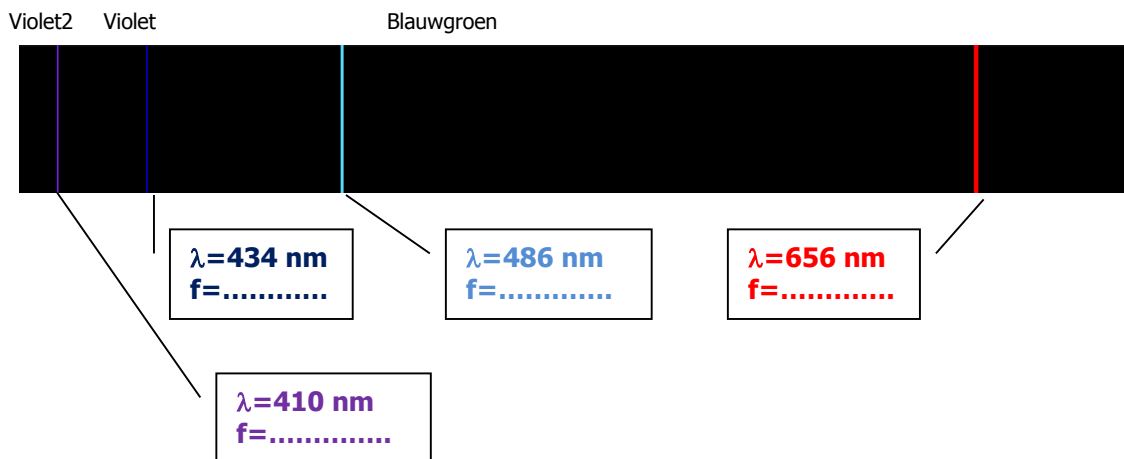
En als je  $n_2 = 5$  en  $n_1 = 2$  kiest?

Violette lijn:  $f_{5 \rightarrow 2} = \dots$

En als je  $n_2 = 6$  en  $n_1 = 2$  kiest?

2<sup>de</sup> Violette lijn:  $f_{6 \rightarrow 2} \dots$

Vergelijk nu de waarden die je berekend hebt met de werkelijke frequenties van de vier zichtbare lijnen van het waterstofatoom (let op: de figuur geeft de golflengtes en je moet eerst de corresponderende frequenties bepalen)



Geeft de formule van Balmer een goede beschrijving van de emissielijnen?

Ja/Nee

En als je  $n_2 = 7$  en  $n_1 = 2$  kiest?

lijn:  $f_{7 \rightarrow 2} \dots$

Wat een golflengte geeft van:

Violet3...  $\lambda = \dots$

Kunnen wij deze emissielijn zien? (Tip: Kijk naar het spectrum van elektromagnetische golven in leerstation VI).

.....

Dus we hebben eigenlijk het bestaan van deze lijn voorspeld!

Als je andere waarden van  $n_1$  en  $n_2$  kiest, vind je ook weer lijnen die bestaan (maar we misschien niet met het oog kunnen waarnemen). Bijvoorbeeld als je de reeks met  $n_1=1$  bepaald, vind je ook lijnen die in het UV-spectrum vallen (korte golflengtes, hoge frequenties).

### 3 Golven en gehele getallen: staande golven

#### 3.a Gehele getallen in natuurtonen

Hoewel Johann Balmer niet wist waarom zijn formule werkte, is het duidelijk dat in de fysica die atomaire emissiespectra kan verklaren gehele getallen moeten voorkomen.

De Broglie en het dubbelspletenexperiment hebben ons ook geleerd dat het elektron een kwantum is van een materieveld. Via de hypothese van De Broglie kunnen we zelfs een golflengte toekennen aan het elektron.

De Broglie speelde muziek en hij kende de fysica van de muziek.

Hierin spelen golven en gehele getallen een centrale rol.

Op een instrument waaraan je niets verandert - zoals een blaasinstrument (waarop je geen gaatjes opent of sluit) of een snaarinstrument (waar je de spanning of lengte van de snaren niet wijzigt) - kan je een precieze rij van tonen opwekken. Op zo een instrument blij je een zekere laagste toon te kunnen opwekken: de grondtoon. De eerstvolgende toon die je kan opwekken klinkt precies dubbel zo hoog: zijn frequentie is het dubbel van de grondtoon. De daaropvolgende toon heeft een frequentie die driedubbel zo groot is, enz. Je kan op zo een instrument **slechts tonen opwekken** (andere zijn niet mogelijk) die **een discrete rij vormen** waarbij de (frequentie van de) ene toon een **geheel veelvoud** is van de volgende.



*De rij van natuurtonen op een Alpenhoorn.  
De tonen die je kan spelen zijn gehele veelvouden van elkaar.*

**De Broglie kende de rol van de gehele getallen in de rij van staande golven op een snaar of in een buis en vroeg zich af of de elektronengolven in een atoom zich zouden kunnen gedragen zoals de rij van golven in zo een muziekinstrument.**

*Zou het mogelijk zijn dat we i.p.v. dat we de natuurtonen te horen zoals van een muziekinstrument, we de 'tonen' van de elektronengolven zouden kunnen zien in de vorm van kleuren?*

Hoewel het redelijk ongelooflijk klinkt, gaan we hier toch het spoor van De Broglie volgen en kijken we of het mogelijk is dat de elektronengolven rond de atoomkern zich zouden kunnen gedragen als golven op een snaar?

### 3.b Gehele getallen in de staande golven op een snaar

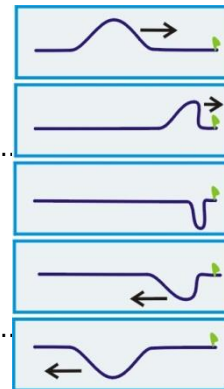
In een interview in 1963 beschreef Louis de Broglie hoe hij ertoe kwam om verder te gaan op het spoor van de elektronengolven:

*... it was certain in the course of summer 1923 - I got the idea that one had to extend this duality to material particles, especially to electrons. ..., in quantum phenomena one obtains quantum numbers, which are rarely found in mechanics but occur very frequently in wave phenomena and in all problems dealing with wave motion. (Bron: <http://www-history.mcs.st-andrews.ac.uk/Biographies/Broglie.html> )*

We gaan nu kijken of er iets gelijkaardigs zou kunnen optreden met de materiegolven van het elektron in het atoom.

#### i) Superpositie van golven in een afgesloten ruimte

We willen nu de voortplanting van een sinusoidale golf in een touw dat aan één kant is vastgemaakt. Kijk naar de figuur hiernaast. Wat gebeurt er als de puls aan het uiteinde van het touw komt?



.....  
 Wat gaat er gebeuren volgens jou als er intussen een andere pulsgolf vertrokken is van links? (Tip: denk aan wat gezien hebben over superpositie en interferentie)

.....  
 En als er in plaats van pulsgolven een continu sinusoidale golf van links vertrekt, wat zal er gebeuren?

.....

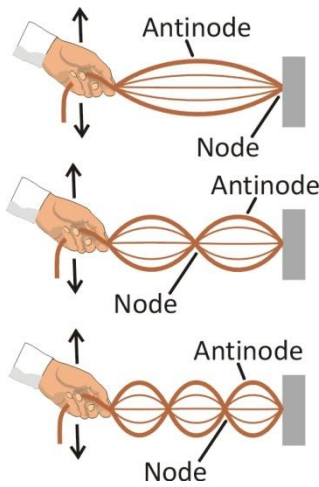
Controleer of het idee dat je hierover hebt, overeenkomt met de theorie. Bekijk daarvoor <http://www.walter-fendt.de/ph14e/stwaverefl.htm>

**Experiment:** Probeer nu zelf het experiment uit te voeren met een touw dat vastzit aan de ene kant. Neem bv. een redelijk lang touw. Laat een persoon het verste uiteinde vasthouden en laat de andere persoon zo gelijkmatig mogelijk een trilling uitvoeren met het nabije uiteinde. Je produceert dan een sinusoidale golf. Het tempo van de op en neergaande beweging van je hand is de frequentie van de golf in het touw. Probeer met verschillende frequenties. Krijg je altijd een stabiele golf?

.....

Afhankelijk van de frequentie waarmee je het uiteinde laat trillen, ga je een chaotische beweging produceren die snel stopt of een mooie golf met een grote amplitude.

Hoe komt het dat sommige golven stabiel zijn en andere zich uitdoven?



**Deze golven die overleven noemen we staande golven**, omdat men de indruk krijgt dat ze zich niet voortplanten. In feite, zijn ze **de golven die stabiel bestaan** **constructieve superpositie (optelling) van lopende golven die zich heen en terug** bewegen richtingen in het touw.

In de figuur hieronder zie je de eerste drie staande golfconfiguraties die je in een touw kan opwekken.

Kan elke willekeurige golf bestaan op deze snaar (als we niets veranderen aan de lengte, spanning en dikte)?

.....

**ii) Superposition of waves confined in space: quantisation**

Sommige frequenties geven geen stabiel golfpatroon d.w.z. dat de heen en teruggaande golven destructief optellen en dus elkaar **uitdoven**.

We krijgen een discrete rij van mogelijke golven op de snaar.

Laten we nu eens nadenken **welke golven constructief optellen?** Welke frequenties hebben deze golven? Zijn dat geen golven die precies passen in de lengte? Om constructieve interferentie te hebben moet de golf terug gelijk aan zichzelf zijn als het terug op dezelfde plaats komt. Zo gaat hij zich versterken.

Als de snaar lengte L heeft, welke afstand moet de lopende golf afleggen om terug naar het beginpunt te gaan?

.....

En wat is de minimale afstand die een sinusoïdale golf met golflengte L moet afleggen om terug gelijk aan zichzelf in het begin te zijn?

.....



Grondtoon of eerste harmonische:  $f_1$

En als de afgelegde afstand gelijk is aan een geheel veelvoud n van de golflengte, is de golf ook terug gelijk aan zichzelf?



Eerste boventoon of tweede harmonische:  $f_2$

Ja/Nee



Tweede boventoon of derde harmonische:  $f_3$

Wat is dan het verband tussen de golflengte  $\lambda$  en de lengte L om constructieve interferentie te hebben?

..... (1)

In de figuur hiernaast zie je de eerste drie golfconfiguraties van een gitaarsnaar.

Hoe lang is de golflengte van de eerste staande golf in termen van de lengte L van de snaar?

$\lambda_1 =$  .....

En van de tweede?

$\lambda_2 =$  .....

En van de derde?

$\lambda_3 =$  .....

Teken hieronder de 4<sup>de</sup> mogelijke golf

Waaraan is dan  $\lambda_4$  gelijk in termen van de lengte L?

$\lambda_4 =$  .....

Schrijf nu de algemene formule voor de hele reeks van golflengtes als functie van de lengte van de snaar L, door gebruikt te maken van het geheel getal n:

$\lambda_n =$  .....

Klopt dit met je antwoord (0) ? Als niet, krijg je hier een kans om je vorige antwoord te verbeteren.

Merk op dat je de rij van golven kenmerkt met **gehele positieve getallen!**

### 3.c Gehele veelvouden in de frequenties van natuurtonen (Eigenfrequenties)

We hebben nu theoretisch afgeleid dat staande golven maar bij bepaalde frequenties kunnen optreden. Maar is dat in de praktijk ook zo? Bekijk hiervoor het filmpje "Natuurtonen". Bij het bekijken van dit filmpje, realiseer je je dat je de rij van mogelijke *tonen* heel goed kan horen. Fysici spreken daarom van de rij van *eigenfrequenties* die overeenkomt met de rij van golflengtes. Kunnen we nu de rij van de golflengtes, van de mogelijke golven, vertalen naar een rij van de mogelijke eigenfrequenties?

Laten we daarom uitdrukkingen van de golflengtes omschrijven naar de rij van frequenties (neem aan dat de golf zich met de snelheid v voortplant, hoe kan je dan golflengte omschrijven in termen van frequentie en snelheid, kijk eventueel terug in een vorig leerstation. Haal dus de  $\lambda$  uit de vergelijking):

$$f_n = \dots\dots\dots$$

**Deze frequenties zijn de *harmonieken* van de snaar. De eerste frequentie is ook *grondharmoniek* genoemd. De andere frequenties, of *boventonen*, zijn gehele veelvouden van de grondtoon.**

Merk op dat als de snaar *niet* opgesloten zit je de frequentie van de golf continu kan wijzigen. Maar als de golf "opgesloten" wordt in een beperkte ruimte, bijvoorbeeld in een touw met lengte L, gaan de ingaande golven met de terugkaatste golven interfereren. Dan

interfereert alles zich dood *behalve voor een discrete reeks van frequenties kunnen er golven de interferentie overleven*. De golven met de andere frequenties verdwijnen binnen een korte tijd wegens destructieve interferentie.

Voor "opgesloten" golven treedt er dus **klassieke kwantisatie** op: een variabele (de golflengte, of de frequentie) die normaal gesproken continu kan variëren, kan nu enkel een reeks van **discrete waarden** aannemen gekenmerkt door **gehele getallen**.

Kijk naar het filmpje: *DestructieveEnConstructieveSuperpositieVanGolvenOpEenSnaar* (je vindt dit bij de mediabestanden die bij deze leerstations horen)

Probeer uit te leggen wat er in het filmpje gebeurt.

.....  
.....

## 4 Staande elektronengolven in het waterstofatoom

### 4.a Golven fitten

De experimenten van Rutherford hebben aangetoond dat de materie bestaat uit positief geladen kernen en negatief geladen elektronen die zich min of meer op een afstand van de kern kan bevinden.

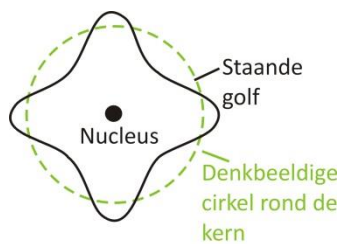
Waarom gaan de elektronen in een atoom niet weg en blijven gemiddeld op een bepaalde afstand van de kern?

.....

Als het elektron van het waterstofatoom zich gemiddeld op een bepaalde afstand van de kern bevindt, is de kracht uitgeoefend door de kern sterk genoeg om het elektron **op te sluiten in een bepaald volume**. Het elektron van het waterstofatoom is een toestand waar hij kan niet ontsnappen van het elektrisch veld van de kern en in een beperkte ruimte moet blijven bewegen.

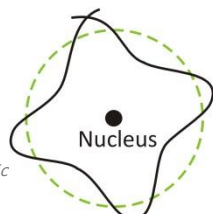
Maar volgens De Broglie is het elektron ook een kwantum van een golvend materieveld. Ook dit materieveld kan dan niet ontsnappen.

***De golf van het elektronmaterieveld in een atoom is dus een "opgesloten golf" enigszins te vergelijken met de snaar die vastgeschroefd zit aan de uiteinden!***



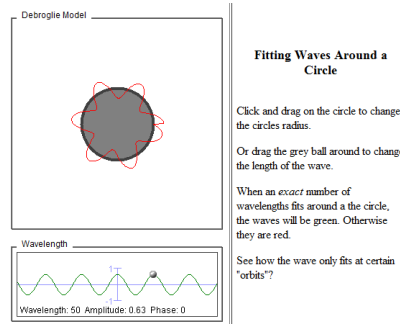
#### Het kwantumfysisch atoommodel van De Broglie: muziek der atomen

Net zoals bij de discrete rij van staande golven op een snaar, veronderstelde De Broglie dat de elektrongolf alleen kon bestaan in een welbepaalde discrete rij van golven. De andere golven zouden zich uitdoven.

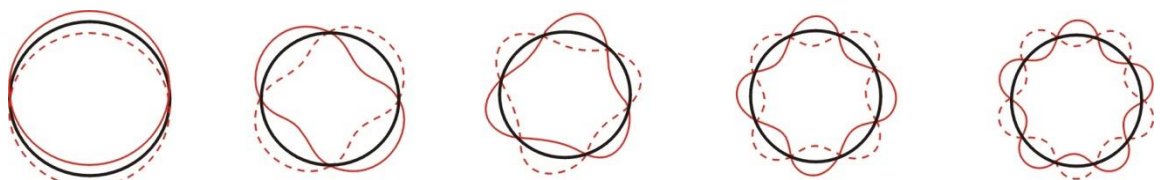
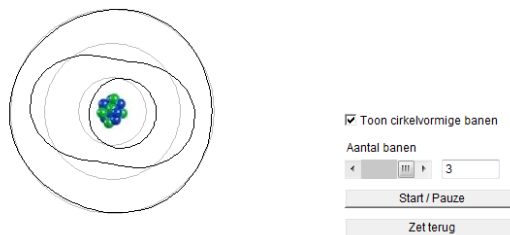


Verken deze hypothese van De Broglie dat de elektrongolf moet sluiten in een cirkel rond de kern op volgende applet

<http://www.colorado.edu/physics/2000/quantumzone/debroglie.html>



Dit is essentieel het De Broglie model voor de elektrongolf. **De golf van het elektron moet langs een cirkelbaan rond de kern sluiten.** De straal  $r$  van de cirkel is de afstand tussen elektron en kern. Verken met deze applet de gedachte van De Broglie. Zie <http://fys.kuleuven.be/pradem/applets/RUG/bohr1/index.htm> (Bron applet: Universiteit Gent)



In de tekening hierboven zie je de eerste vijf staande golfconfiguraties op een cirkel.

**De elektrongolf van De Broglie is dus opgesloten in een lengte die de omtrek van een cirkel voorstelt.** Hoe groot is deze lengte (in symbolen)

$L(r) = \dots\dots\dots$

Er is een verschil tussen de situatie van de elektrongolf rond de kern en de situatie van een snaar met twee vaste uiteinden.

Als de golf langs de cirkel van lengte  $L$  beweegt, welke afstand moet hij afleggen om terug op dezelfde plaats te zijn?

$\dots\dots\dots$

Als de golf van de ene naar de andere uiteinde van de snaar van lengte  $L$  gaat, heeft hij de lengte  $L$  afgelegd, maar is hij terug op dezelfde plaats gekomen?

Ja/Nee

Welke afstand moet de golf afleggen in de snaar van lengte L om terug op dezelfde plaats te zijn?

.....

Daarom moet voor een **staande golf op een snaar**

.....

Maar voor een **staande golf op een cirkel** moet

.....

De laatste zin die je zopas ingevuld hebt geeft de **kwantisatievoorwaarde** voor het elektron in het waterstofatoom. Schrijf die conditie als een formule

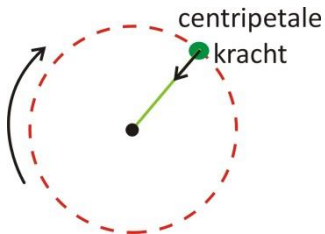
.....

die het verband geeft tussen de mogelijke golflengtes van het elektron en de afstand r tussen het elektron en de kern:

.....

Vul nu de golflengte van het elektron volgens de hypothese van De Broglie:

..... (2)



Het mooie van de hypothese van De Broglie is dat we zowel het deeltjes als golfkarakter van het elektron kunnen beschouwen. **De golf die rond de kern moet passen, daarvan kunnen we ook het deeltjeskarakter beschouwen.** Als het elektron als deeltje langs een cirkelbaan beweegt, moet er een centripetale kracht uitgeoefend worden op het elektron.

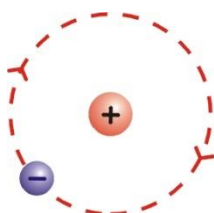
De centripetale kracht levert een centripetale versnelling naar het middelpunt. We weten uit de mechanica van Newton voor de cirkelbeweging dat deze centripetale versnelling omgekeerd evenredig is met de afstand en kwadratisch toeneemt met de snelheid:

$$F_{\text{centripetal}} = m \frac{v^2}{r}$$

$\frac{v^2}{r}$  is the centripetal acceleration

Nu in het geval van het elektron rond de kern: **welke veldkracht levert deze centripetale kracht?** Wie oefent die uit?

.....



Nu Coulomb heeft ontdekt hoe groot deze elektrische kracht is. De grootte is evenredig met de grootte van de 2 ladingen en neemt omgekeerd kwadratisch af met de afstand tussen elektron en kern .

Schrijf hieronder de wet van Coulomb die dit tot uiting brengt (in symbolen):

.....

Dus de elektrische veldkracht van de kern levert de centripetale kracht op het elektron. Dit betekent dat beide krachten aan elkaar moeten gelijk zijn. Schrijf hieronder in symbolen op dat de coulombkracht gelijk moet zijn aan de massa van het elektron maal de centripetale versnelling van de cirkelbeweging.

..... (3)

Vergeet in bovenstaande formule niet dat de lading van het elektron en het proton gelijk zijn aan  $e$ : de elementaire lading in het universum.

## 5 Berekening met het Kwantum Atoommodel

### 5.a De afmeting van het waterstofatoom voorspellen

Misschien schijnt de redenering die je tot nu toe gevolgd hebt je redelijk nutteloos toe. Tijd voor een eerste concreet resultaat uit je kwantumfysisch atoommodel. We kunnen nu de afmeting van het waterstofatoom voorspellen! Daartoe gaan we uit vgl. (2)  $r$  oplossen.

Neem het kwadraat van vergelijking (1) en isoleer  $mv^2$  aan een kant van de vergelijking. Je bekomt:

..... (4)

Isoleer nu in vergelijking (2) ook de grootheid  $mv^2$  aan de linkerkant van het gelijkheidsteken.

..... (5)

De grootheden die je aan de rechterkant van twee vergelijkingen (3) en (4) moeten dus ook gelijk aan elkaar zijn. Schrijf deze vergelijking hieronder:

..... (5a)

Isoleer de afstand  $r$  aan de linkerkant van het gelijkheidsteken en je vindt

$r =$  ..... (6)

Controleer je antwoord met onderstaande formule

$$r = n^2 \frac{h^2 \epsilon_0}{\pi m e^2}$$

Behalve het geheel getal  $n$ , kennen we alles aan de rechterkant van de vergelijking? Ja/Nee

Als je Nee beantwoordt hebt, denk nog eventjes na. De massa en de lading elektron zijn gekend en de universele constanten  $h$  en  $\epsilon_0$  ook.

**Met ons kwantumfysisch atoommodel  
hebben we de mogelijke afstanden tussen het elektron en de kern  
kwantitatief kunnen voorspellen!**

Die afstanden zijn **gekwantiseerd**, er is een alleen een discrete reeks van afstanden die mogelijk zijn. Het geheel getal  $n$  kunnen wij kiezen. Voor welke  $n$  is de afstand het kleinst?

$n = \dots\dots\dots$

Als  $n$  groter wordt, wordt de afstand tussen elektron en kern  $\dots\dots\dots$

Vul deze waarde van  $n$  in in vergelijking (4), samen met alle waarden voor de verschillende constanten, en bepaal de kleinste mogelijke afstand tussen het elektron en de kern.

$r_1 = \dots\dots\dots$  (7)

Deze afstand heeft een naam, de **Bohrstraal**, en geeft de meeste waarschijnlijke afstand tussen het elektron en de kern.

Ga de Bohrstraal opzoeken op het internet. Klopt het met wat je gevonden hebt? (Je kan de numerische waarde en ook de formule vinden voor de Bohrstraal. Soms wordt  $h$  met een streepje gebruikt, die gelijk is aan  $h/2\pi$ )

De Bohrstraal geeft de orde van grootte in lengte van de kwantumfenomenen.

We hebben al een groot resultaat bereikt met ons simpele kwantummodel, maar we moeten we nog een stap verder gaan om onze initiële doel te bereiken: de emissielijnen van waterstof berekenen.

## 5.b Emissielijnen van waterstof voorspellen

### i) Gekwantiseerde energieën

Vermits kwantumtheorie ervan uitgaat dat deeltjes kwanta zijn van velden die energie dragen, gaan we de totale energie van het elektron in het veld van de kern beschouwen. We vermoeden dat de **energie** van het elektron in het atoom **gekwantiseerd** is.

Als het elektron langs de cirkelbaan met snelheid  $v$  beweegt, wat is zijn kinetische energie?

$E_k = \dots\dots\dots$

Wegens (5) kunnen we deze  $E_k$  direct schrijven in termen van

Anderzijds heeft het elektron potentiële energie omdat het zich in het elektrostatisch veld van de kern bevindt: (Tip: voorzichtig met het teken)

$E_p = \dots\dots\dots$

Wat is dan de totale energie van het elektron? Gebruik de vergelijkingen die je al hebt in de uitdrukking voor de totale energie.

$E_{tot} = \dots\dots\dots$

Vervang nu r met vergelijking (6). Op die manier komt er **het geheel getal n** in! Uiteindelijk moet je deze vergelijking krijgen:

$$E_{tot} = E_p + E_k = -\frac{1}{n^2} \frac{me^4}{8\epsilon_0^2 h^2} \quad (8)$$

(Als het niet klopt, ga terug op zoek naar je fout.)

**Dat de totale energie van het elektron gekwantiseerd is volgt dus uit het kwantumfysisch atoommodel van De Broglie.**

Als n groter wordt, wordt de totale energie van het elektron

.....

Als  $n=\infty$  dan betekent dat dat het elektron ver van de kern is (zie de uitdrukking voor r). Dat is een vrij niet-gebonden elektronen. Hoe groot is de energie als  $n=\infty$ ?

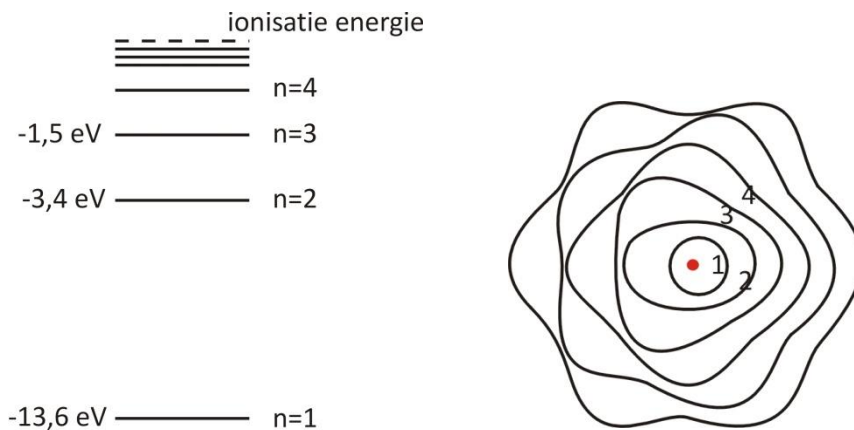
.....

Als de afstand tussen elektron en kern groter wordt, wordt de totale energie van het elektron

.....

Kan de totale energie van het elektron continu veranderen?      Ja/ Nee

We kunnen de mogelijke gekwantiseerde energietoestanden van het elektron in het waterstofatoom voorstellen in een ladder, met 'energiesporten' die variëren naargelang de waarde van het geheel getal n



**ii) Gekwantiseerde energie-overgangen**

Nu is de gedachte dat de **elektronengolven van de ene discrete trillingstoestand kunnen overgaan op de andere**. Zo winnen ze of verliezen ze een **kwantum van energie**. Misschien dat deze **kwanta van energie overeenkomen met de energiekwanta van de fotonen die we waarnemen...** Immers de energie die het elektronveld verliest, dat kwantum zou het elektromagnetisch veld kunnen opnemen. Is dit

kwantum groot, dan zou dit blauw licht kunnen veroorzaken, is dit kwantum klein dan zou dit rood licht kunnen geven. Laten we dit eens uitrekenen en zien of deze gedachte klopt:

Als het elektron van de energietoestand verbonden met het getal  $n_2$  naar de energietoestand van met het getal  $n_1$  gaat, hoe groot is dan de verandering in energie voor het elektron? Geef je resultaat in symbolen.

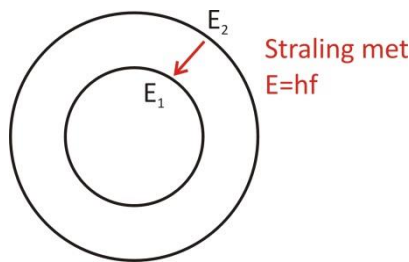
$\Delta E_{n_2 \rightarrow n_1} = \dots\dots\dots (9)$

Als het elektron  
van een toestand met grotere energie  
naar een toestand met kleinere energie gaat,  
wordt er een foton geproduceerd  
met energie gelijk aan de verandering van de energie van het elektron.

*Als de frequentie van de foton in het zichtbaar elektromagnetisch spectrum is, gaan we die foton zien als licht van een bepaalde kleur.*

In leerstation VII hebben we het verband tussen de energie van het foton en de frequentie van de geassocieerde elektromagnetische golf gezien (formule van Einsteijn-Planck). Als we dus veronderstellen dat het elektromagnetisch veld de vrijgekomen energie uit het elektronveld opneemt dan weten we dat de energie  $\Delta E$  van het foton een frequentie zal hebben volgens de formule van Planck:

$\Delta E = \dots\dots\dots$



Nu kan je de formule schrijven voor de frequentie van de elektromagnetische golf geproduceerd door een transitie van het elektron in het waterstofatoom tussen toestanden  $n_2$  en  $n_1$ :

$f_{n_2 \rightarrow n_1} = \dots\dots\dots$

**Eindelijk!!! Dit is de formule die de frequentie van de emissielijnen van het waterstofatoom voorspelt!**



Controleer je resultaat met de vergelijking hieronder:

$$f_{n_2 \rightarrow n_1} = \frac{m \cdot e^4}{8 \cdot \epsilon_0^2 \cdot h^3} \left( \frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right)$$

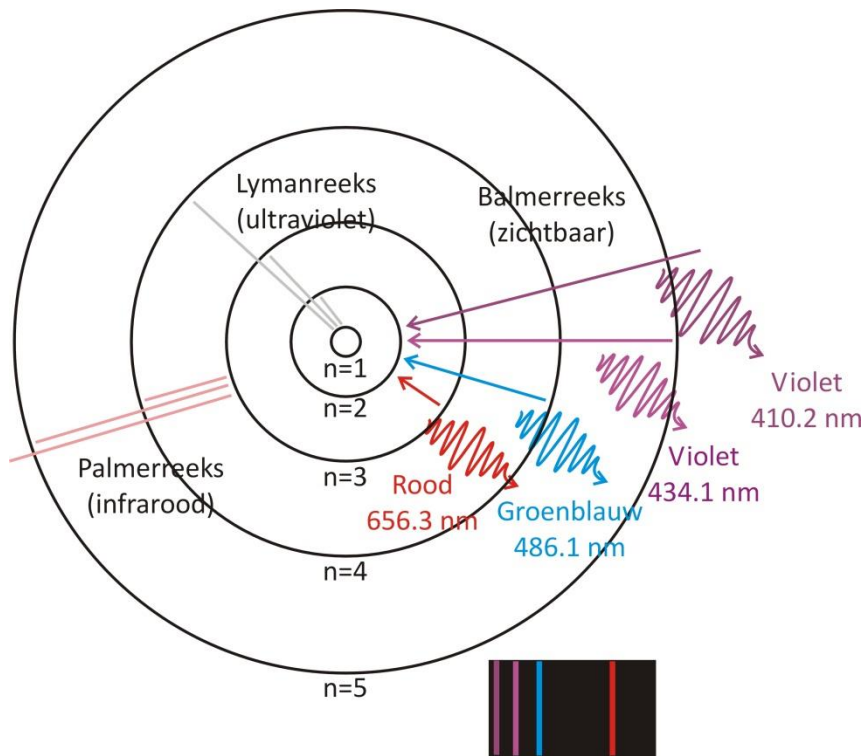
Klopt het? Proficiat! Je hebt de frequenties van de emissielijnen van het waterstofatoom kunnen voorspellen. (Als het niet klopt, ga terug en probeer je fout te vinden.)

Vergelijk nu je resultaat met de formule van Balmer die je in het begin van dit leerstation gezien hebt.

Wat is de theoretische uitdrukking voor de constante R in de formule van Balmer?

R=.....

## 6 Interpretatie van de formule van Balmer



In de figuur hierboven zie je de eerste vier mogelijke cirkels waarop het elektron kan bewegen, voor het geheel getal  $n = \dots, \dots, \dots, \dots$ .

De stralen van deze cirkels zijn gegeven door formule (.....).

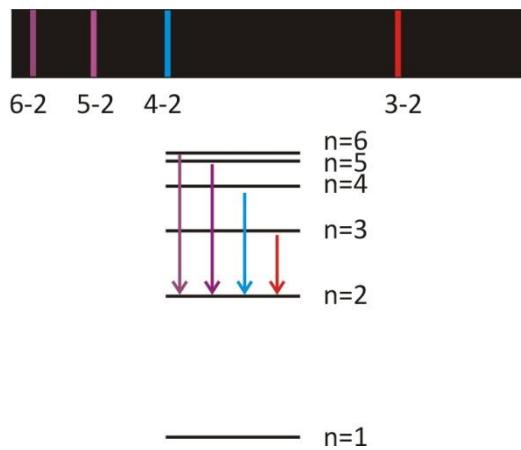
Hoe verder het elektron is van de kern, hoe ..... is zijn totale energie.

Als het elektron van een toestand van hogere energie naar een toestand van lagere energie gaat, (of van een cirkelbaan met ..... straal naar een cirkelbaan met

..... straal)wordt er een ..... geproduceerd met energie gelijk aan .....

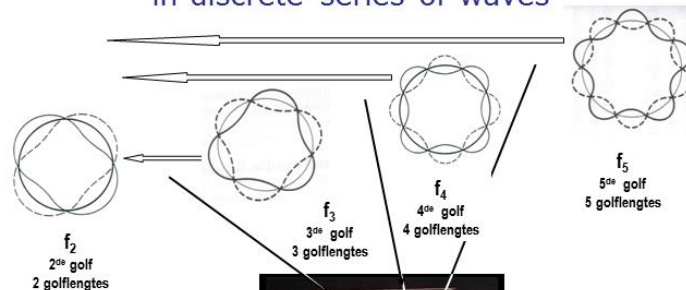
De gehele getallen  $n_1$  en  $n_2$  die een bepaalde transitie identificeren kunnen we op heel veel verschillende manieren kiezen. Waarom zien we dan maar vier emissielijnen van het waterstofatoom?

.....



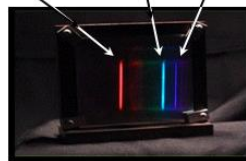
### Physical model of the H-atom

Suppose the matter field of the electron can only exist in discrete series of waves



The field changes its wave mode in steps.

Discrete energy changes are spread out in an EM-field.



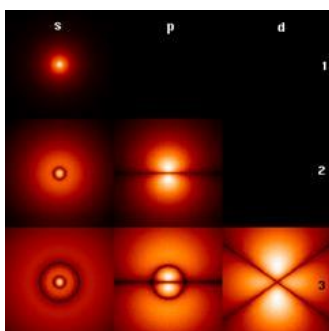
This EM-field can give off photons of discrete colours corresponding precisely with the energy decrements of the matter field.

## 7 3-dimensionale veralgemening: Orbitalen

Als een elektron gebonden is aan een atoom, betekent dit eigenlijk dat het vastgehouden, gevangen zit in een beperkte ruimte rond de kern. Inderdaad het is de elektrische aantrekking van de kern die het elektron gevangen houdt. Maar dan moet de golflengte van het elektron passen in dat gebied. Dit betekent dat de golven weerkaatsen en terug superponeren bij de oorspronkelijke golven. Dit proces doet meestal de heen en weer lopende golven uitdoven en slechts welbepaalde golven blijven over: diegene die passen in de toegewezen ruimte. het leidt als vanzelf naar de kwantisatie van golven en dus van energieën van elektronen in een atoom.

Maar De Broglies golven zijn 2-dimensionaal. Maar de 2-dimensies van De Broglie zijn in feite een vereenvoudigd model zijn van de 3-dimensionale trillingsmodi van de elektronengolven rond de atoomkern.

Het was de briljante Oostenrijkse fysicus Erwin Schrödinger die De Broglie's materiegolven veralgemeende naar oplossingen in een 3-dimensionale ruimte. Hij schreef een golfvergelijking op (de zogenaamde Schrödinger-vergelijking) waarvan de oplossingen 3-dimensionale staande golven zijn: orbitalen genoemd. Je ziet de mogelijke 3-dimensionale trillingstoestanden of orbitalen van het elektron in het waterstofatoom. Misschien hoor je verder in de lessen scheikunde hoe deze orbitalen ervoor zorgen dat de elementen zich kunnen verbinden tot zoveel moleculen.



*De trillingstoestanden of orbitalen van het electron rond de kern van het waterstofatoom. Een licht kleur betekent dat de golf een hoge amplitude heeft, een donkere een kleine. (Bron: Florian Marquardt, Cond. Matter Physics, LMU University München)*



De Schrödinger golfvergelijking is een fantastisch werktuig: je kan oplossingen berekenen voor elk chemisch element. Zo kan je de precieze orbitalen berekenen die je in de chemie tegenkomt. Men kan zelfs de chemische binding verklaren door het voorspellen van de moleculaire orbitalen.

*De Oostenrijkse fysicus Erwin Schrödinger die De Broglie golven uitbreidde naar 3 dimensies. De gekwantiseerde trillingstoestanden die als oplossing van zijn vergelijking gevonden kunnen worden, kennen we vandaag als orbitalen. Met deze orbitalen begrijpen we de elektronenstructuur van de verschillende chemische elementen en kunnen we zelfs de chemische bindingen verklaren.*



Einstein over het kwantumfysisch atoommodel

*...discover the major laws of the spectral lines and of the electron shells of the atoms together with their significance for chemistry appeared to me like a miracle and appears to me as a miracle even today. This is the highest form of musicality in the sphere of thought*

## 8 Concepten in Leerstation V

Vervolledig de ontbrekende concepten:

### Klassieke concepten

Staande golven in een snaar of in een muziekinstrument.

Slechts een discrete rij van tonen, waarbij de frequentie van de ene toon een ..... **veelvoud** is van de grondtoon, kan opgewekt worden doordat de golf is in een klein gebied: dat is een voorbeeld van klassieke kwantisatie.

Staande golven in een snaar: de .....(of .....) van de "overlevende" golven kan slechts discrete waarden aannemen :  $\lambda n = 2 L / n$ .

Doordat het elektron ook een **deeltje** is en doordat het langs een cirkelbaan beweegt, moet er een centripetale kracht uitgeoefend worden op het elektron. Deze kracht is .....kracht door de kern uitgeoefend.

### Kwantumconcepten

De golf van het elektronmaterieveld in een atoom is een "opgesloten golf". De Broglie veronderstelde dat de elektrongolf alleen kon bestaan in een welbepaalde **discrete** rij van staande golven.

Kwantisatievoorwaarde voor het elektron in het waterstofatoom: de **golflengte** van het elektron moet een geheel veelvoud zijn van ..... van de circulaire baan rond de kern.

Het kwantum atoommodel van De Broglie laat toe om de mogelijke afstanden tussen het elektron en de kern kwantitatief te voorspellen: deze afstanden zijn (continu/gekwantiseerd)

De Bohrstraal, m.a.w. de kleinst mogelijke afstand tussen elektron en kern in het waterstofatoom, komt overeen met de (meest/minst) waarschijnlijke afstand tussen het elektron en de kern.

De totale energie van het elektron is gekwantiseerd in het De Broglie atoommodel. Hoe verder het elektron is van de kern, hoe (kleiner/*groter*) is zijn totale energie.

Als het elektron van een toestand van hogere energie naar een toestand van lagere energie gaat, wordt er een ..... geproduceerd met energie gelijk aan *het* .....-**verschil**. De frequentie van de foton kan berekend worden met de formule van Balmer.

## Bibliografie

M.F. Crommie, C.P. Lutz, D.M. Eigler. **Confinement of electrons to quantum corrals on a metal surface.** *Science* 262, 218-220 (1993).