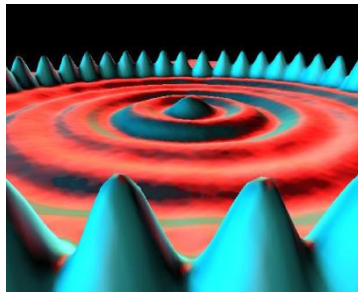




Brug tussen het onderzoek in modern fysica
en het ondernemen in nanotechnologie

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



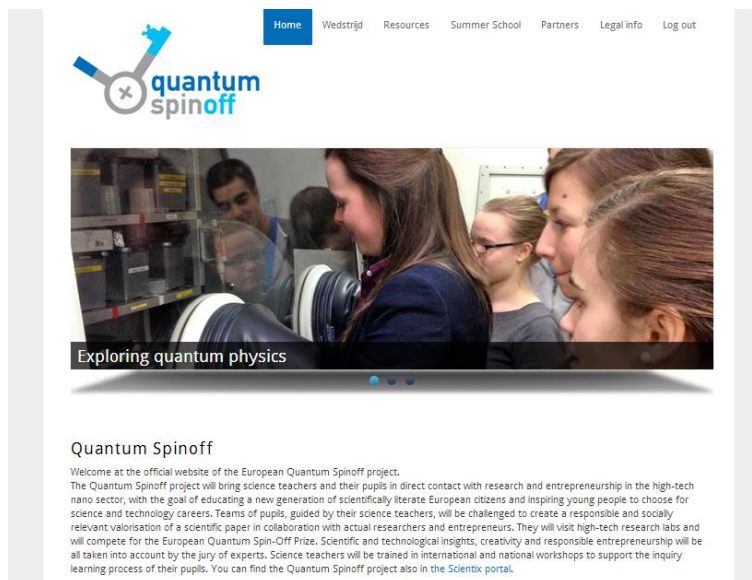
Lifelong
Learning
Programme

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



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-IMOMECE
- (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



DEEL 1: CONCEPTEN VAN DE KWANTUMFYSICA

LEARNING STATION I: VOOR KLASSIEKE FYSICA ONBEGRIJPelijke FENOMENEN?	9
1 Het einde van de klassieke mechanica	9
2 Het verlies van het begrip baan: het dubbelspleet-experiment voor elektronen	10
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
3 Discrete emissie- en absorptiespectra van de elementen	16
3.a Kleuren typisch voor een chemisch element	16
3.b Discrete emissielijnen uit atomen	17
3.c Discrete Absorptielijnen	18
4 Discrete spectraallijnen verklaren?	19
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
5 Concepten van leerstation I	23

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.

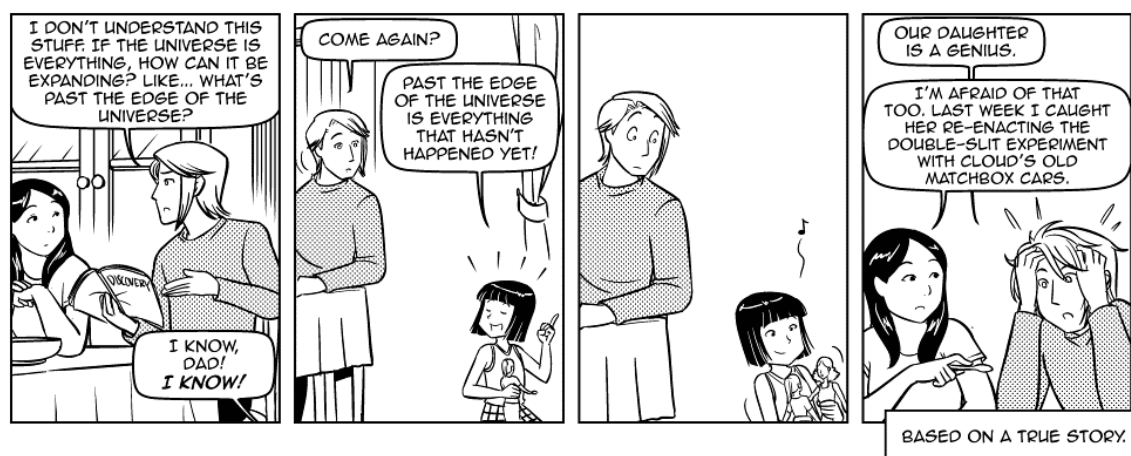


Figure 1 Matchbox Cars and Quantum Physics
(Source: Sandra and Woo comic strip by Knörzer and Powree published under Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivs 3.0 License.).

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>)*

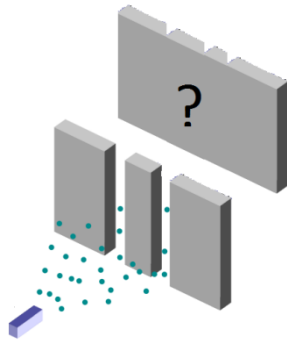
Volgde elk zandkorreltje een bepaald pad door één van de spleten?
(JA/NEE)

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.

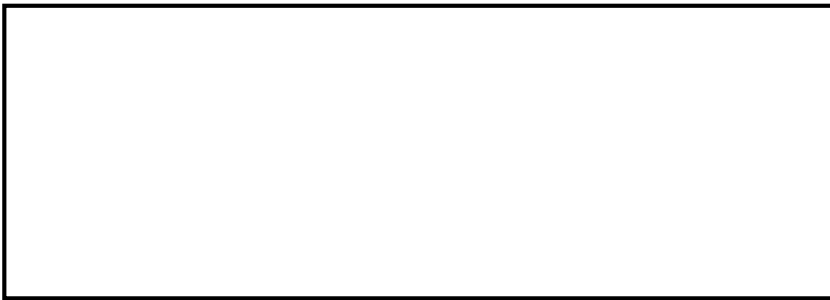


Als je elektronen schiet op een scherm met daarin 2 spleten (die heel kort bij elkaar staan), welk patroon verwacht je dan te zien op het scherm dat achter de spleten staat?

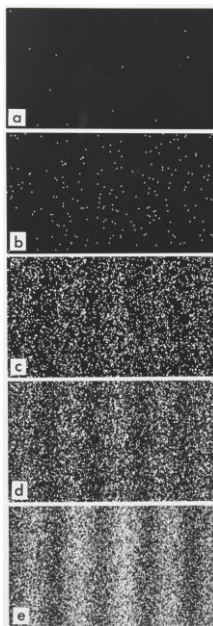
Figuur 3 Schematische voorstelling van het 2-spletenexperiment met elektronen (Bron: Adapted van Wikipedia Public Domain)

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

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)

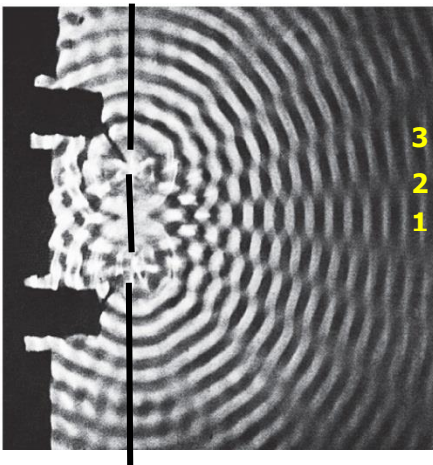
Figuur 4 Build-up of an interference pattern. The number of detected electrons is 100 (b), 3000 (c), 20000 (d), 70000 (e). (Bron: Tonomura, A., Endo, J., Matsuda, T., and Kawasaki, T. (1989) Demonstration of single-electron buildup of an interference pattern, American Journal of Physics 57 (2), 117-120)

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. Quantum¹:

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

¹ 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.

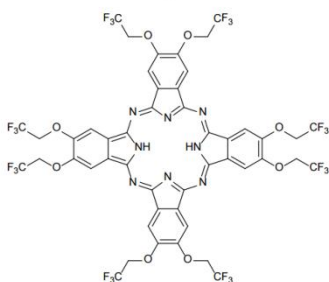
Denk jij dat het gedrag van het elektron uitzonderlijk is in de materie, of gaan ook grotere moleculen een gelijkaardig interferentiepatroon produceren in het dubbelspleet experiment?

.....

Het dubbelspleet experiment is recent ook uitgevoerd met de grote **fullereen moleculen**, C₆₀, ook **bucky 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.

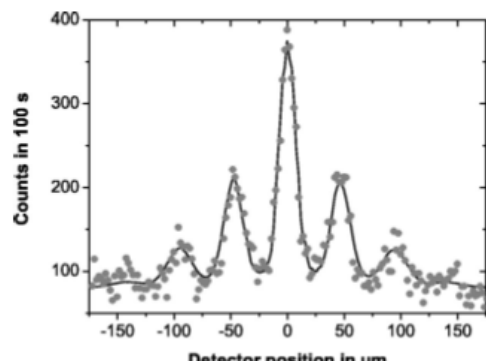
Hoe groter 'voorwerpen' worden, hoe kleiner het golfkarakter, de golflengte wordt (we komen daarop terug in leerstation IV). Daarom worden interferentie-experimenten met grotere 'dingen' steeds moeilijker: je hebt steeds kleinere spleten nodig, die steeds korter op elkaar staan om een interferentiepatroon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



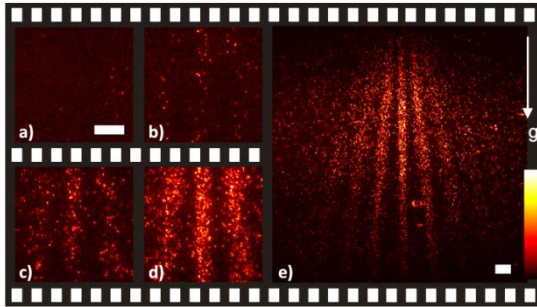
Recent is er een 2-spletenexperiment uitgevoerd met een heel groot molecule. Het gaat om grote kleurstofmoleculen met massa's meer dan 500 keer groter dan de massa van een koolstofatoom. Ook deze grote massieve molecule hebben nog een golfkarakter. Als je voldoende kleine spleten hebt, kan je zien dat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



Figuur 6 Het fullereen C₆₀ 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

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.

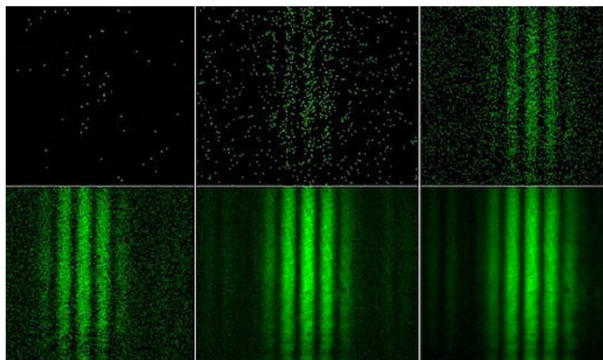
Maar goed, wat kunnen we nu besluiten: Is het elektron 'speciaal' of Is de golf-deeltje dualiteit een fundamentele eigenschap van alle materie?

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?')



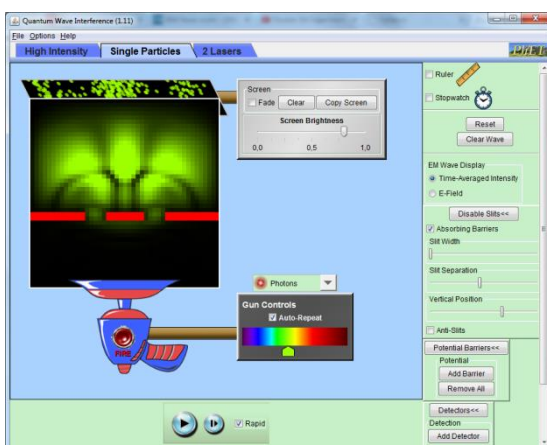
Maar als we de lichtintensiteit drastisch naar beneden brengen, zien we dat het licht – waarvan we dachten dat het een golf was – toekomt deeltje per deeltje. Deze lichtdeeltjes worden fotonen genoemd.

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

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^{de} 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

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.

Kwikdamlampen 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.

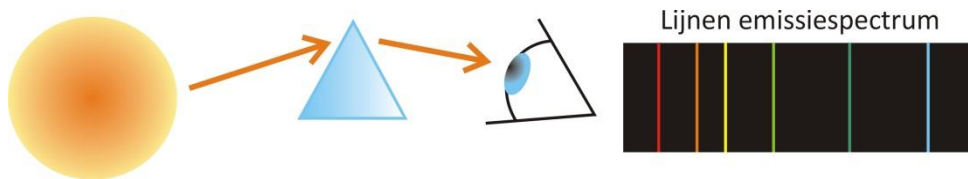
Het zijn dus de atomen zelf
die de karakteristieke kleuren uitzenden.

De vraag die fysici einde 19^{de} en begin 20^{ste} 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**.

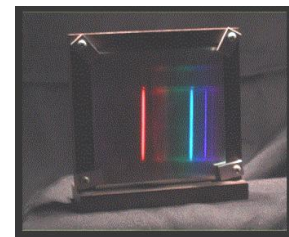
Met een prisma of een rooster, kunnen we het licht splitsen en zien we uit welke afzonderlijke kleurlijnen het licht uitgezonden door deze stof is opgebouwd. Een rooster is een dia met zeer fijne (verticale) lijntjes op.



*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!

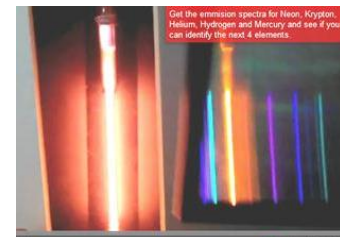


*Figuur 12 Het karakteristieke lijnenspectrum van atomaire **waterstof** bestaat uit 3 heldere lijnen: een rode, een blauwe en een violette lijn.*

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

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.



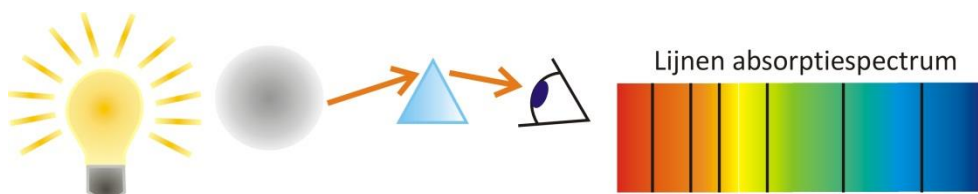
Bekijk het filmpje 'The Spectrum of Stars' op www.youtube.com/watch?v=l4yg4HTm3uk (Opm: 'sodium' is Engels voor 'natrium')

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.

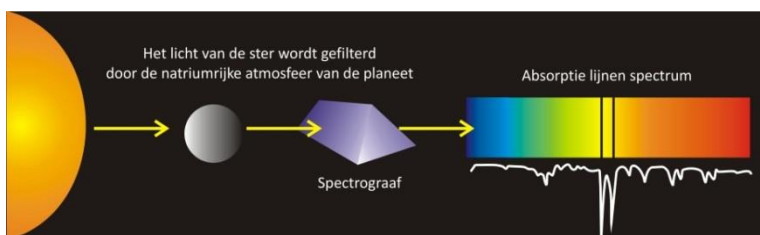
3.c **Discrete Absorptielijnen**

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?

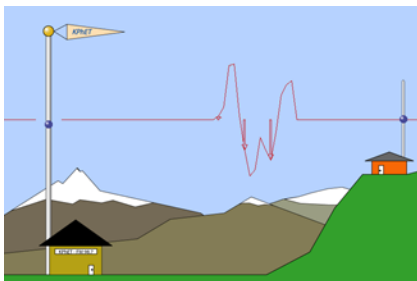
Het antwoord moeten we in de eerste plaats gaan zoeken in het atoom zelf.

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^{de} 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

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?

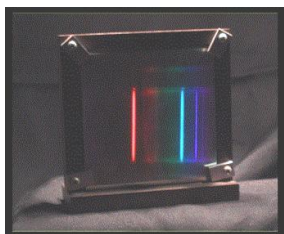
Om dit te onderzoeken, moeten we het klassieke atoommodel van Rutherford van naderbij bekijken. Het atoommodel van Rutherford was het laatste klassieke atoommodel voor de komst van de kwantummechanica...

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.



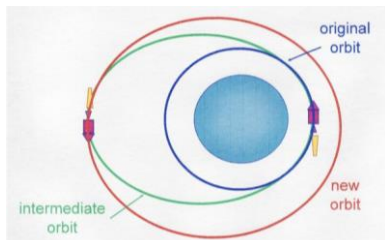
Nu het waterstofatoom heeft 3 sterke lijnen: een rode, een blauwe (turquoise) en een violette.

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.

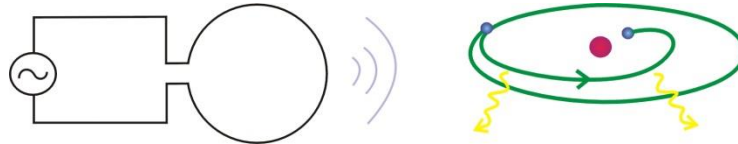
Zendt het waterstofatoom alle mogelijke kleuren uit?
(JA/NEE)

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.