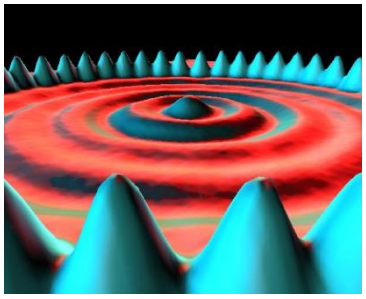
Brug tussen het onderzoek in moderne fysica
en het ondernemen in nanotechnologie

Kwantumfysica

De fysica van het kleine
met de grote toepassingen



Fysica 3de jaar
Geïntegreerde leerstofmodule Moderne Fysica 3-1

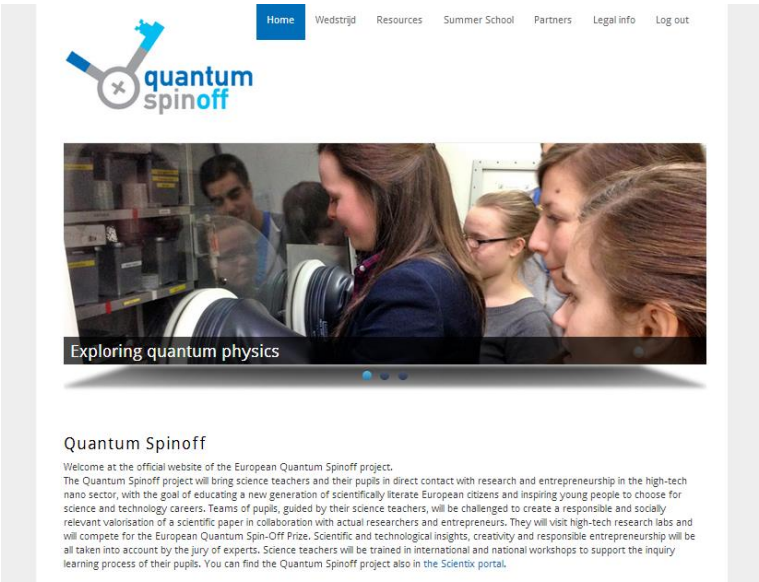
Renaat Frans, Laura Tamassia

Quantum Spin-Off is funded by the European Union under the LLP Comenius programme
(540059-LLP-1-2013-1-BE-COMENIUS-CMP).
Renaat Frans, Hans Bekaert, Laura Tamassia
Contact: renaat.frans@khlim.be

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-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. (2014) Quantum SpinOff Learning Stations. Centre for Subject Matter Teaching, KHLim Katholieke Hogeschool Limburg, Diepenbeek, Belgium

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

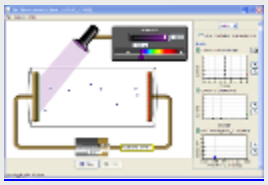
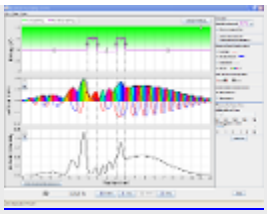
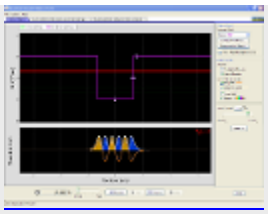
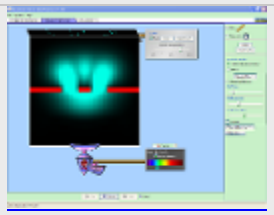
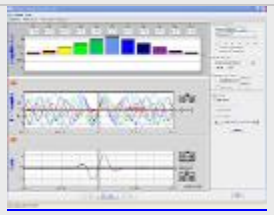
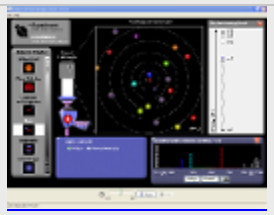
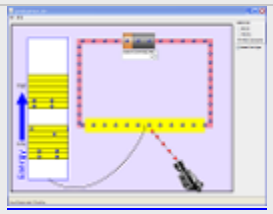
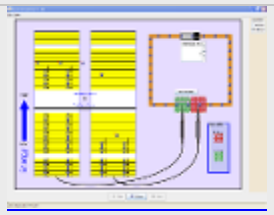
MOVIES

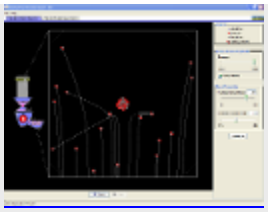
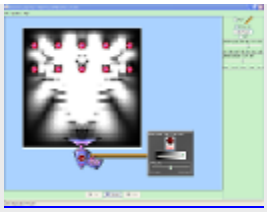
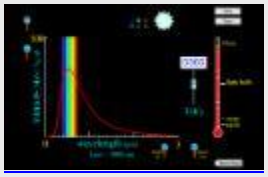
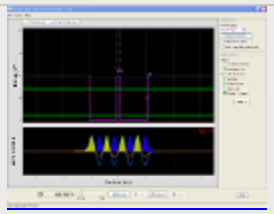
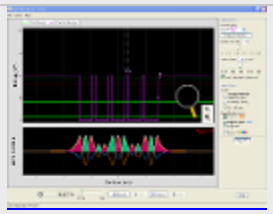
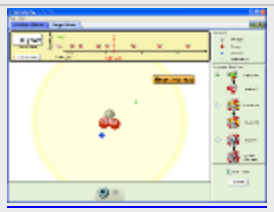
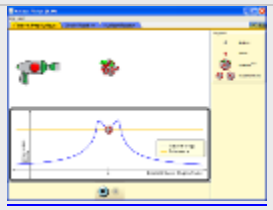
Following movies can be interesting to use in the classroom:

- *Science movie: Nanoyou - 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.

 Photoelektric effect	 Quantum Tunneling and Wave Packets	 Quantum Bound States
 Quantum Wave Interference	Lasers	Neon lights & Other Discharge Lamps
 Fourier: Making waves	Simplified MRI	 Models of the Hydrogen Atom
Stern-Gerlach experiment	 Conductivity	 Semiconductors

 Rutherford scattering	 Davisson-Germer: Electron Diffraction	 blackbody-spectrum
 Double Wells and Covalent Bonds	 Band Structure	 Beta Decay
Alpha Decay	 Nuclear Fission	

DEEL 1: CONCEPTEN VAN DE KWANTUMFYSICA

LEARNING STATION I: ONBEGRIJPELIJKE FENOMENEN? 6

1 De notie van baan in de klassieke mechanica 6

2 Het verlies van het begrip baan: het dubbelspleet experiment voor elektronen 7
2.a Door welke spleet gaat het elektron? 7
2.b Het 2-spletenexperiment voor golven 9
2.c 2-spleten experiment elektronen: dualiteit deeltje-golf 9
2.d Dubbelspleet experiment met grote moleculen 9

3 Karakteristieke emissie- en absorptiespectra van elementen 10
3.a Kleuren typisch voor een chemisch element 10
3.b Discrete emissielijnen uit atomen 11
3.c Discrete Absorptielijnen 12

4 Hoe deze discrete spectraallijnen verklaren? 13

LEARNING STATION II: WAT IS LICHT? 16

1 Bestaat licht uit een stroom deeltjes? 16
1.a Newtons deeltjestheorie voor licht 16
1.b Foucaults experiment vergeleek de lichtsnelheid in lucht met die in water. 19

2 Bestaat licht uit golven? 20
2.a De veronderstellingen van Christiaan Huygens 20
2.b Hoe kan het dat lichtstralen elkaar kunnen kruisen? 20
2.c Welke uitwijking ontstaat op de plaatsen waar afzonderlijke golven samenkomen? 21
2.d Golffront, golflengte, periode 22
2.e Snelheid van een golf 23

3 Hoe Huygens eigenschappen van licht kon verklaren 24
3.a Het principe van Huygens 24
3.b Weerkaatsing en breking verklaren met golftheorie 24
3.c Diffractie verklaren met golftheorie 25

4 Het 2-spleten experiment voor licht 26
4.a Waarom ontstaan er maxima en minima in het 2-spleten experiment? 26
4.b Verschillende weglengte, andere fase 27

LEARNING STATION III: WAT GOLFT ER BIJ LICHT? 28

1 Mechanische golven 28
1.a De bron van mechanische golven 28
1.b Medium nodig? 28
1.c Voortplanting en uitwijking in zelfde zin of andere zin? 29
1.d Verplaatsen deeltjes zich met een golf mee? 30
1.e De bron van lichtgolven 31

2 Intermezzo: Zijn er trillingen die zich *niet* herhalen? 31

3 Licht: wat golft er? 34

3.a Kracht(velden) die werken door het vacuüm 34
3.b Velden die veranderen in de tijd: golven van een veld 36
3.c Elektromagnetische golven 38

LEARNING STATION IV: DEELTJE-GOLF DUALITEIT – KWANTA VAN VELDEN 40

1 Dubbelspleet experiment met licht van lage intensiteit 40

2 Kwantumtheorie van licht en materie 42
2.a Elektromagnetische golven en energiekwanta: fotonen 42
2.b Materiegolven en kwanta 43

3 Kwantumvelden 44

LEARNING STATION V: DE EMISSIELIJNEN VAN WATERSTOF VERKLAARD MET KWANTUMMECHANICA 47

1 Discrete emissiespectra van elementen verklaard? 47

2 De formule van Balmer 48

3 Golven en gehele getallen: staande golven 50
3.a Staande golven op een snaar 51

4 Staande elektronengolven in het waterstofatoom 54

5 Emissielijnen van waterstof berekenen met kwantumfysisch atoommodel 58

6 Interpretatie van de formule van Balmer 61

Learning station I: Onbegrijpelijke fenomenen?

1 De notie van baan in de klassieke mechanica

In de klassieke mechanica is het 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.

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

Newton formuleerde 3 beginselen op grond waarvan hij zijn mechanica grondvestte.

Formuleer hieronder deze 3 beginselen (zoek eventueel op):

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

Voorbeeld: De baan voorspellen in een horizontale worp

Beschouw het horizontaal weggooien van een voorwerp met beginsnelheid v_0 vanaf een zekere hoogte h (in ideale omstandigheden zonder luchtweerstand). Wat is dan de baan? Kunnen we die precies voorspellen in de klassieke mechanica?
Om de baan te kennen moeten we de x- en de y-coördinaat kunnen geven in functie van de tijd: x(t) en y(t).

In de x-richting geldt wegens het 1ste beginsel (ook wel …….. genoemd) dat de snelheid v_x (verandert/constant blijft). Bijgevolg neemt de x-coördinaat recht evenredig met de tijd toe

$$x = v_0 . t$$

In de y-richting werkt de zwaartekracht. Die veroorzaakt een uniform (versnelde/vertraagde/constante) beweging. De afgelegde valafstand neemt dan kwadratisch met de tijd toe. Uit de kinematica weten we dat

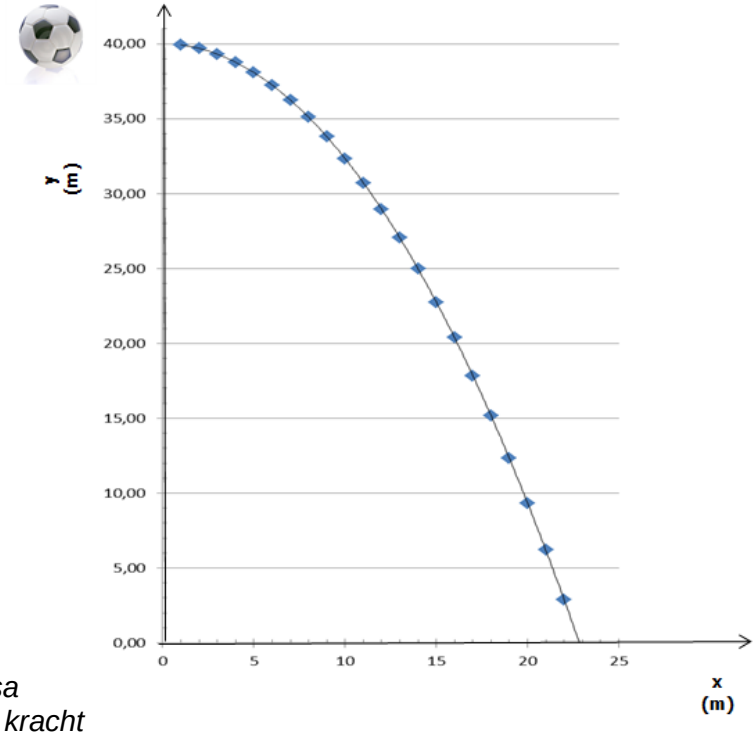
$$valafstand = \frac{1}{2} g t^2$$

met g de valversnelling. Als je begint op een hoogte h wordt de y-coördinaat

$$y(t) = h_0 - \frac{1}{2} g t^2$$

Vermits we x(t), kunnen geven en y(t), kunnen we op elk ogenblik de positie van het voorwerp geven in een verband y met x.

Je kan t elimineren en een uitdrukking schrijven voor y in functie van x. Dan krijg je het voorschrift van de baan hiernaast.



Figuur 1 De baan van een bal, horizontaal weggeworpen met beginsnelheid v_0 van 8 m/s vanop een hoogte van 40m

Klassieke Mechanica

Geef me van een massa beginpositie, beginsnelheid, kracht

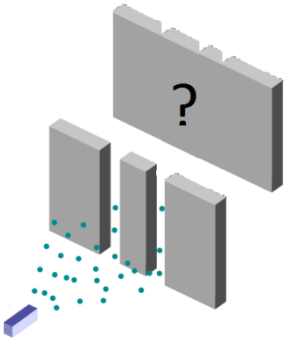
↓

Je kan baan voorspellen van deeltje

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

2.a Door welke spleet gaat het elektron?

Het is mogelijk om *afzonderlijke elektronen uit de materie te halen* en ze als "balletjes" weg te schieten.



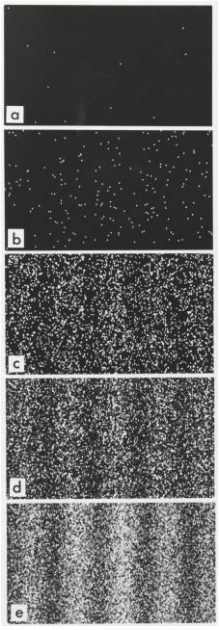
Als je elektronen op een obstakel schiet met daarin 2 spleten die heel kort bij elkaar staan, krijg je het ondertussen beroemde twee-spleten experiment voor elektronen. Op grond van de klassieke mechanica van Newton, die elektronen gewoon beschouwt als heel kleine balletjes, wat zou je verwachten om op een scherm achter de spleten te zien?

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

Denk bv. aan kleine druppels inkt uit een spuitbuis. Als je sprayverf sproeit op een blad met twee spleten waarachter een tweede blad gehouden wordt als scherm, welk patroon

ga je zien op het scherm? Maak hieronder een tekening van dit experiment, waar het patroon op het scherm duidelijk te zien is.

Het klassieke verwachtingspatroon voor het 2-spletenexperiment met elektronen



De foto's en het filmpje 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": www.youtube.com/watch?v=oxknfn97vFE

Kan je nog volhouden dat een elektron ofwel door de ene spleet, ofwel door de ander gaat?

(Ja/Nee)

Kan je dan nog spreken van een baan van het elektron als je niet kan aannemen dat het elektron door de ene ofwel door de andere spleet is gegaan?

(Ja/Nee)

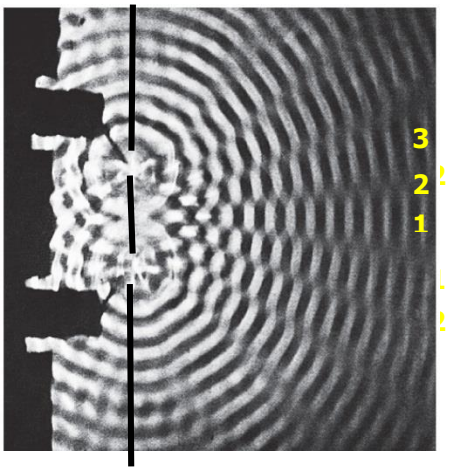
Het begrip precieze baan en lokaliteit blijkt inderdaad verloren te gaan in de kwantummechanica. De klassieke mechanica schiet dus te kort. Zie ook de animatiefilm van dr. Quantum[1]: www.youtube.com/watch?v=DfPeprQ7oGc

Figuur 3 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)

D
e elektronen komen dus één na één toe, maar je kan niet zeggen door welke spleet ze zijn gegaan. Merk dat ze in 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?

[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!

2.b Het 2-spletenexperiment voor golven



Kijken we even naar een 2-spleten experiment voor watergolven uit de klassieke fysica (zie foto). Golftoppen zijn helder weergegeven, golfdalen zijn donker. Vlakke gebieden zijn grijs.
Waar vind je golftoppen en –dalen? …….
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).

Figuur 4 *Interferentie van watergolven (Bron: PSSC Physics Haber-Schaim, Dodge, Gardner, Shore. Kendall/Hunt, 1991.)*

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

2.c 2-spleten experiment elektronen: dualiteit deeltje-golf

Een elektron kan men in de kwantummechanica niet louter meer opvatten als een 'balletje' zoals dat in de klassieke fysica het geval is. Een deeltje heeft ook een golfkarakter:

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

Deze dualiteit golf-deeltje lijkt een fundamenteel gegeven te zijn in de natuur. De kwantummechanica heeft ons denken over de wereld dan ook totaal veranderd. We zullen in een volgend leerstation onderzoeken of ook licht deze duale aard heeft.

In jaar 2002 hebben de lezers van het tijdschrift Physics World het mooiste experiment van de fysica gekozen. Zoek op welk experiment heeft er gewonnen?

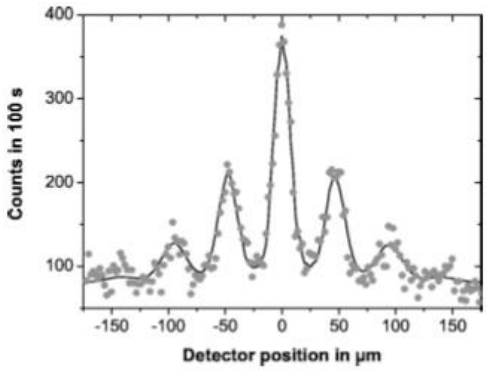
2.d Dubbelspleet experiment met grote moleculen

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?

Figuur 5 Het fullerene C_60 molucuul is de kleinste voetbalbal ter wereld (uit: O. Nairz, M. Arndt en A. Zeilinger, "Quantum interference experiments with large molecules")

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 fullerene molecuul is eigenlijk de kleinste voetbalbal van de wereld.
Het resultaat van het experiment kan je zien in de figuur.



Figuur 6 Fullerene interferentiepatroon (uit: O. Nairz, M. Arndt en A. Zeilinger, "Quantum interference experiments with large molecules")

Is het elektron "speciaal" of is deeltje-golf dualiteit een fundamentele eigenschap van alle materie?

.....

.....

3 Karakteristieke emissie- en absorptiespectra van elementen

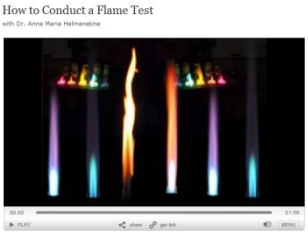
3.a Kleuren typisch voor een chemisch element

Eind 19de eeuw was al bekend dat stoffen bij verhitting **karakteristieke kleurenspectra** uitzenden. Als je een stof in een vlam werpt, dan krijg je een kleur die karakteristiek is voor die stof.

Figuur 7 Natrium of koper in een vlam werpen, geeft de karakteristieke gele kleur voor Na of blauw voor Cu.

Op die manier kan men nagaan met welke stof men te doen heeft.

Voer zelf enkele vlamproeven uit.



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

De typische kleuren die een stof kan uitzenden, zijn nog beter waar te nemen in **gasdruklampen**. 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. *Kwikdamplampen* zie je bijvoorbeeld in de koplampen van een auto, ze geven het typische wit-blauwe licht.

3.b Discrete emissielijnen uit atomen

Of je een stof verhit in een vlam of je brengt het chemisch element in gasvormige toestand in een gasdruklamp, je krijgt de kleuren eigen aan de gebruikte stof. Natrium in een vlam of in een gasdruklamp geeft steeds precies dezelfde herkenbare gele kleur. Door verhitting in de vlam of in een gasdruklamp krijgen we de elementen in **atomaire** toestand.

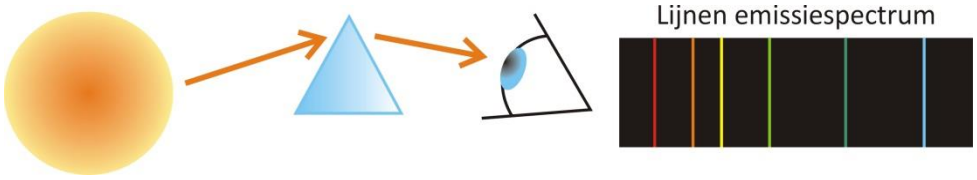
Het zijn dus de atomen zelf
die de karakteristieke kleuren uitzenden.

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

Hoe kan een atoom zo precieze kleuren uitzenden?

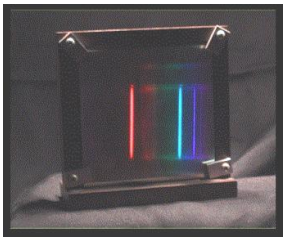
Fysici hadden niet verwacht dat de zoektocht naar het antwoord op deze vraag tot een nieuwe fysica zou leiden: *de kwantumfysica*. We zullen in deze leerstations die zoektocht samen met jou reconstrueren. We zullen vaststellen dat op nanoschaal de klassieke fysica niet meer juist blijkt te zijn en dat we nieuwe fundamentele eigenschappen van de materie op het spoor komen, die ons – en de fysici tot het begin van de 20ste eeuw, ontgaan waren.

Onze zoektocht start bij de karakteristieke kleuren van de emissiespectra. Met een prisma of een rooster, kunnen we het licht splitsen en zien uit welke kleuren het licht van emissiespectra is opgebouwd.



*Figuur 8 Een atomair gas straalt licht uit dat je met een prisma of rooster kan splitsen in de samenstellende kleuren. Je ziet dat de kleur is opgebouwd uit een **discreet aantal** precieze kleurenlijnen. Deze discrete emissielijnen zijn kenmerkend voor het element*

Laten we bijvoorbeeld kijken naar het emissiespectrum van waterstof, het eerste element in de tabel van Mendelev, het meest eenvoudige element en tegelijk de meest voorkomende stof in het universum. Mocht er in je schoollabo een *waterstoflamp* en een *spectroscoop* zijn, moet je het emissiespectrum zeker ook met eigen ogen bekijken. Vraag dit aan je leerkracht.



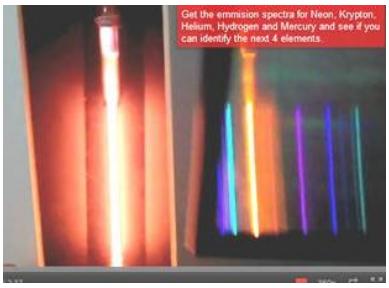
*Figuur 9 Het karakteristieke lijnenspectrum van atomair **waterstof** bestaat uit 3 heldere lijnen: een rode, een blauwe en een violette lijn.*

In het laatste leerstation van deel 1, zal je, precies zoals Niels Bohr en 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!

i) Bepaal het gebruikte element in 4 gasdruklampen

In volgend filmpje wordt het licht van gasdruklampen gevuld met 4 verschillende elementen, gesplitst in zijn samenstellende kleuren. In plaats van een prisma, stuurt men het licht door een rooster. Een rooster is een dia met zeer fijne lijntjes op, (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 verschillende lampen. Bepaal dan welke stof elke lamp bevat.

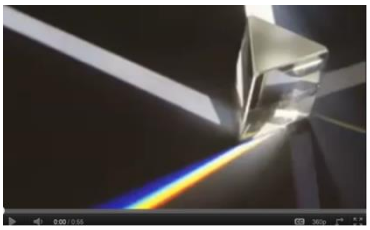


Figuur 10 Atomic Spectra - Name that element
www.youtube.com/watch?v=1gT7hlYvKg0&feature=related

Lamp	Welk element?
1	
2	
3	
4	

ii) Bestudeer 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.



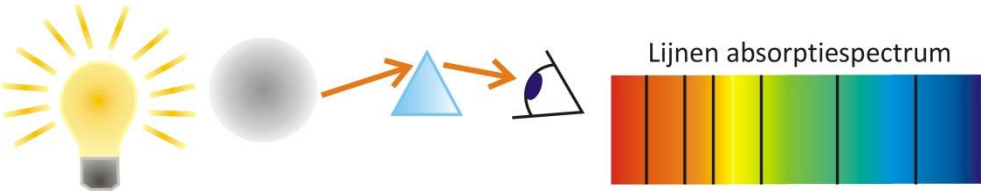
Bekijk het filmpje 'The Spectrum of Stars' op
www.youtube.com/watch?v=l4yg4HTm3uk

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

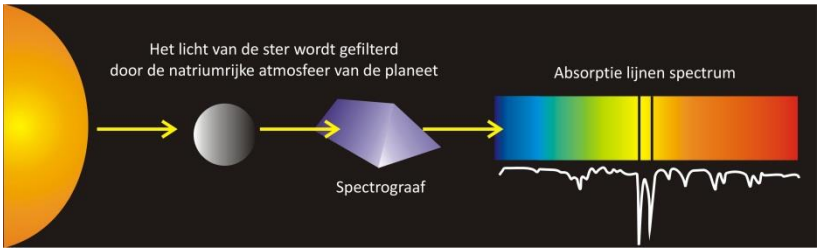
Als ster- of zonlicht op haar weg naar de waarnemer een koude gaswolk passeert, kunnen specifieke kleuren van het uitgezonden licht geabsorbeerd worden. Daardoor ontstaan zwarte, geabsorbeerde lijnen in het spectrum. Die lijnen noemt men absorptielijnen. Het bijhorende spectrum noemt men een absorptiespectrum.

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



*Figuur 11 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 bv. 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. (Opm: 'sodium' is Engels voor 'natrium')



De absorptie van licht kan in welbepaalde lijnen optreden als het licht door een specifiek element wordt geabsorbeerd:

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

4 Hoe deze discrete spectraallijnen verklaren?

We komen dus terug tot de vraag:

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 ziet dat eruit?

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

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

Hoewel de klassieke fysici het niet eens waren over wat licht precies is, was het volgens hen wel duidelijk dat licht een elektromagnetisch fenomeen moest zijn en wellicht iets te maken had met de *beweging van ladingen in een atoom*. Vermits een *elektron* een geladen deeltje is, zou het door zijn *beweging* een *elektromagnetische veld* kunnen opwekken, *licht* dus.

Kunnen we met klassieke fysica begrijpen
waarom een stof discrete lijnenspectra kon uitzenden of absorberen?

Het ontstaan van licht, een veranderend elektromagnetisch veld dat zich voortplant, moet gezocht worden in de beweging van ladingen in het atoom. De elektronen zijn bewegende

ladingen in het atoom. Ze kunnen als atomaire 'zenders' worden beschouwd. Door hun beweging kunnen ze een trillend elektromagnetisch veld uitzenden, licht dus. Net zoals een antenne waarop je een wisselstroom zet, radiogolven of infrarood licht kan uitzenden (naargelang de frequentie van je wisselstroom). De uitgezonden radio- of infraroodgolven zijn immers ook 'licht' maar dan van een – in dit geval - wat langere golflengte dan zichtbaar licht.

Dus volgens de klassieke theorie kan de beweging van elektronen inderdaad de oorzaak zijn van het uitzenden van licht door atomen. Maar kan de beweging van elektronen zo geordend zijn dat er precieze en discrete kleurlijnen worden uitgezonden? Laten we daarom het klassieke atoommodel van Rutherford nader bekijken. Rutherford zijn atoommodel was het laatste klassieke atoommodel voor het ontstaan van kwantumechanische atoommodellen.

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

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

De Deen Niels Bohr, die bij Rutherford in Cambridge student was, zag in dat het klassieke beeld van de elektronen die als planeten rond de atoomkern draaien, nooit aanleiding zou kunnen geven tot precieze kleuren. Immers deze discrete kleuren vereisen een precieze beweging of trilling van een elektron. Voor het uitzenden van rood licht (met een lagere frequentie) zou het elektron trager moeten draaien, voor het uitzenden van blauw licht (hogere frequentie) zou het elektron sneller moeten draaien. Een bepaalde trilling of draaiing zou kunnen zorgen voor een bepaalde kleur. Het waterstofatoom bijvoorbeeld, dat toch zeker 3 heldere emissielijnen heeft, zou dus zeker 3 precieze banen moeten hebben.

Figuur 12 Heisenberg en Bohr in Kopenhagen in 1934 (Bron foto: AIP, American Institute for Physics, foto genomen door Paul Ehrenfest).

Maar in het klassieke atoommodel van Rutherford draaien de elektronen rond de kern zoals planeten rond de zon. Een planeet kan altijd in een lagere baan komen of in een hogere baan als je energie afvoert of toevoert. Maar waarom zouden er maar een paar banen toegelaten zijn, diegenen die overeenkomen met de frequenties van het waargenomen licht van de emissielijnen? Klassiek gezien zijn alle energieën toegelaten en zou een ronddraaiend elektron licht van allerlei frequenties, van allerlei kleuren kunnen uitzenden.

Erger nog een ronddraaiend elektron in een klassiek atoommodel zoals dat van Rutherford, moet continu 'licht uitzenden'. Zoals een antenne waarop een wisselstroom staat voortdurend elektromagnetische golven uitzendt, zo moet ook het ronddraaiende elektron voortdurend elektromagnetisch golven uitzenden.

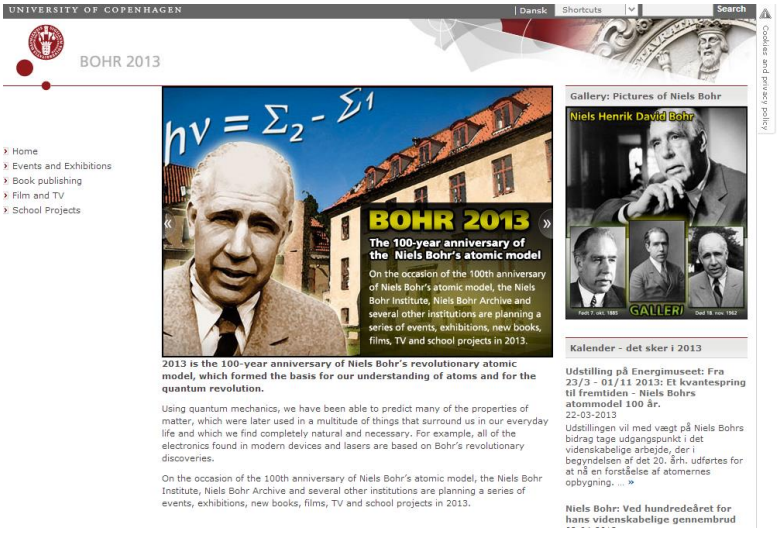
Figuur 13 Net zoals in een antenne de elektronen in een trillende wisselstroom, voortdurend elektromagnetische golven uitzenden, zou een elektron dat continu rond een atoomkern draait voortdurend radiogolven uitzenden. Niels Bohr zag in dat het elektron dan continu energie zou verliezen waardoor het energie zou verliezen en op de kern zou vallen. Atomen kunnen dus helemaal niet bestaan in de klassieke fysica. Laat staan dat de draaiing van de elektronen op een tempo zou gebeuren die precies overeekomt met de waargenomen frequenties van de emissielijnen.
(Bron figuur: EDN, march 2000)

Maar terwijl je in een antenne voortdurend energie toevoert, moet het uitzenden van elektromagnetische golven door het atoom ten koste gaan van de bewegingsenergie van de ronddraaiende elektronen. De ronddraaiende elektronen zouden voortdurend energie verliezen aan het uitgezonden elektromagnetisch veld.

Bohr besefte 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 één van de laatste leerstations gaan we met het kwantummechanisch atoommodel van De Broglie de discrete emissielijnen uitrekenen.

In het volgende deel nemen we je mee in een zoektocht naar de nieuwe principes van de kwantumfysica. Net zoals fysici zoals Max Planck, Albert Einstein, Niels Bohr, Louis De Broglie, Werner Heisenberg, zullen we inzien dat we de bewegingen van licht en materie (zoals elektronen in atomen) **niet** kunnen begrijpen met de klassieke mechanica of de klassieke golventheorie.

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