

## QUANTUM- & ATOOMFYSICA – VWO

Foton is een opgavenverzameling voor het nieuwe eindexamenprogramma natuurkunde.

Foton is gratis te downloaden via [natuurkundeuitgelegd.nl/foton](http://natuurkundeuitgelegd.nl/foton)

Uitwerkingen van alle opgaven staan op [natuurkundeuitgelegd.nl/uitwerkingen](http://natuurkundeuitgelegd.nl/uitwerkingen)

Videolessen over de theorie zijn te vinden op [natuurkundeuitgelegd.nl/videolessen](http://natuurkundeuitgelegd.nl/videolessen)

Theorie bij dit hoofdstuk wordt behandeld in onderstaande videolessen:

[ElektronVolt](#)

[Fotoelektrisch effect](#)

[Nulpuntsenergie](#)

[Fotonen](#)

[Golf of deeltje](#)

[Waterstofatoom](#)

[Atoommodellen](#)

[Dubbelepleetexperiment](#)

[Energieput](#)

[Energieniveaus](#)

[Brogliegolven](#)

[Tunneleffect](#)

[Gasontladingslamp](#)

[Onzekerheidsprincipe Heisenberg](#)



### 1 Laserpointer

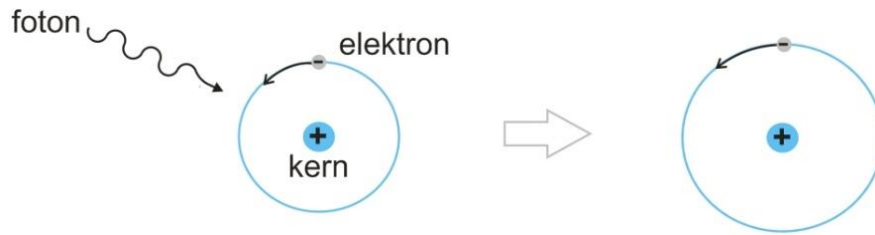
Een laserpointer heeft een vermogen van 5,0 mW en zendt rood licht uit met  $\lambda = 635 \text{ nm}$ .

- Hoe groot is de fotonenergie van het uitgezonden licht?
- Bereken hoeveel fotonen de laserpointer per seconde uitzendt.
- Stel dat de laserpointer geen rood maar blauw licht zou uitstralen. Beredeneer of het antwoord op de vorige vraag hoger of lager zou zijn (geen berekening).

### 2 Rutherford

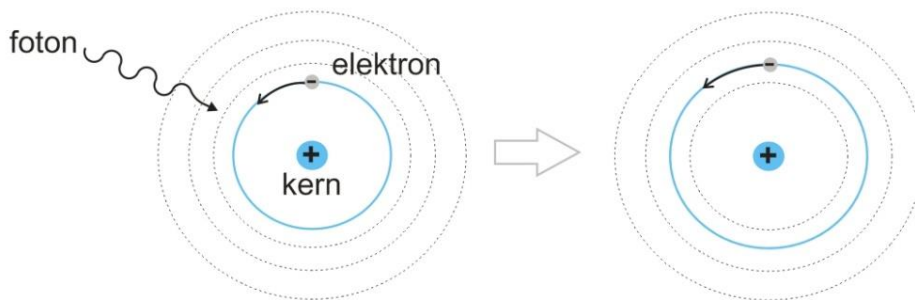
Volgens het atoommodel van Rutherford draaien negatief geladen elektronen om een positief geladen kern heen. Als er door het atoom licht geabsorbeerd wordt gaat het elektron naar een hogere baan die verder van de kern ligt.

- Het elektron wat om de kern draait lijkt op de aarde die om de zon draait. Waar komt in het geval van de aarde en de zon de middelpuntzoekende kracht vandaan?
- Waar komt volgens het model van Rutherford de middelpuntzoekende kracht vandaan in een atoom?
- Leg uit waarom het verder weg gaan van de kern energie kost.
- Waar komt de energie vandaan om verder van de kern te komen?
- Een elektron verder van de kern heeft van zichzelf de neiging om terug te vallen naar een lagere baan. Wat gebeurt er met de energie die hierbij vrijkomt?



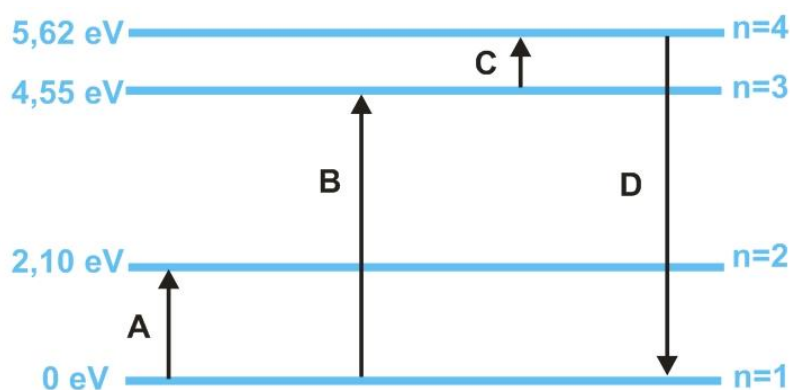
### 3 Bohr

Een van de tekortkomingen van het atoommodel van Rutherford is dat het niet verklaart waarom er in gassen een lijnspectrum ontstaat. Alleen bepaalde golflengte licht worden geabsorbeerd en andere juist niet. De Deense natuurkundige Niels Bohr kwam met een aanpassing van het atoommodel van Rutherford om het ontstaan van spectraallijnen te kunnen verklaren. Volgens Bohr zijn alleen bepaalde banen zijn toegestaan voor elektronen. De meeste banen zijn verboden. Leg uit waarom dit een verklaring is voor het ontstaan van lijnspectra.



### 4 Energieniveaus

Hieronder staat een energieschema van een atoom. Bereken bij elke overgang de bijbehorende golflengte en bepaal of er licht wordt geabsorbeerd of juist wordt uitgezonden.



## 5 Aangeslagen toestand

In een atoom bevindt een elektron zich in de 3<sup>e</sup> aangeslagen toestand.

- Wat is de grootte van het getal  $n$  wat bij deze toestand hoort?
- Op hoeveel verschillende manieren kan het elektron terugvallen naar de grondtoestand?
- Hoeveel spectraallijnen komen er minimaal voor in het spectrum van dit atoom?

## 6 Lijnenspectrum

Van een atoom is ontdekt dat het energieschema 5 niveaus bevat.

- Beredeneer hoeveel spectraallijnen er in het spectrum van het atoom voorkomen.
- Bij nadere bestudering blijkt één energieniveau eigenlijk uit twee niveaus te bestaan die vlak bij elkaar liggen (verschil is kleiner dan 0,1 eV). Bram en Eva zijn het niet eens over de consequenties voor het spectrum. Volgens Bram betekent dit dat er in het spectrum één spectraallijn bij komt in het infrarood met een heel lage energie. Volgens Eva worden 4 van de spectraallijnen dubbel (zoals in het spectrum van natrium in BINAS tabel 20). Leg uit dat beide effecten tegelijk zullen optreden.

## 7 Waterstofspectrum

*Gebruik bij deze opgave BINAS tabel 21A*

De overgangen in het energiediagram van waterstof zijn onderverdeeld in verschillende groepen, genoemd naar de ontdekkers van de bijbehorende spectraallijnen: De Lymanreeks, De Balmerreeks en de Paschenreeks. De spectraallijnen in het zichtbare deel van het waterstofspectrum horen bij de Balmerreeks.

- In welk gebied van het spectrum (infrarood, zichtbaar of ultraviolet) zitten de spectraallijnen die bij de Lymanreeks horen?
- De Lymanreeks bestaat uit alle overgangen van hoger gelegen niveaus ( $n > 1$ ) naar de grondtoestand ( $n = 1$ ). Hiervan staan in de tabel niet alle overgangen weergegeven. De grootste energieovergang die in de tabel staat is die van  $n = 6$  naar  $n = 1$  met 93,8 nm als bijbehorende spectraallijn. Bereken hiermee de energie van  $n = 6$  ten opzichte van de grondtoestand in eV.
- Bereken de golflengte van de volgende lijn in de Lymanreeks. Bepaal hiervoor eerste de energie van  $n = 7$  met behulp van één van lijnen uit de Balmerreeks.
- Naast de Lyman-, Balmer- en Paschenreeks bestaan er meer reeksen. De Bracketreeks bevat alle lijnen die horen bij overgangen van hogere niveaus naar  $n = 4$ . De Pfundreeks bevat alle lijnen die horen bij overgangen van hogere niveaus naar  $n = 5$ . Bereken de golflengte van de eerste lijn in de Pfundreeks.

## 8 Ionisatie-energie

De ionisatie-energie is de energie die nodig is om een elektron van de grondtoestand naar

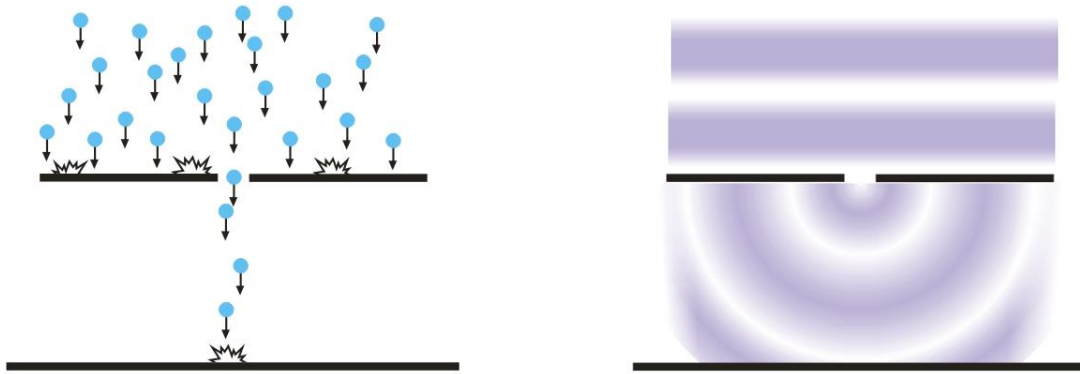
het ionisatie-niveau te brengen. Wanneer een atoom een foton met een fotonenergie gelijk aan die van de ionisatie-energie absorbeert raakt het atoom geïoniseerd.

- a Leg uit wat ionisatie betekent.
- b De spectraallijn die bij de ionisatie-energie hoort is altijd de spectraallijn met de kortste golflengte van een atoom. Leg uit waarom.
- c Je zou verwachten dat waterstof de atoomsoort is met de laagste ionisatie-energie. De lading van een waterstofkern is immers het laagst en het kost minder energie een elektron weg te halen bij een atoomkern met een lage lading dan een atoomkern met een hogere lading. In BINAS tabel 21C staan de ionisatie-energieën van verschillende atoomsoorten. Er zijn meerdere atoomsoorten met een ionisatie-energie lager dan die van waterstof. Leg uit hoe dit kan.

## 9 Buiging

Met het gedrag dat vertoond wordt als iets op een kleine opening valt kan bepaald worden of het om deeltjes gaat of om een golf. In de afbeelding links staat wat er met deeltjes gebeurt. De deeltjes gaan rechtdoor en komen op alleen terecht op de positie recht onder de opening. In de afbeelding rechts staat wat er gebeurt als een golf op dezelfde opening valt. De golf vertoont *buiging*. De opening gedraagt zich als een bron van waaruit de golf zich in alle richtingen verplaatst. Aangezien de golf zich in alle richtingen voortplant wordt valt de golf niet alleen op de positie recht onder de opening maar overal.

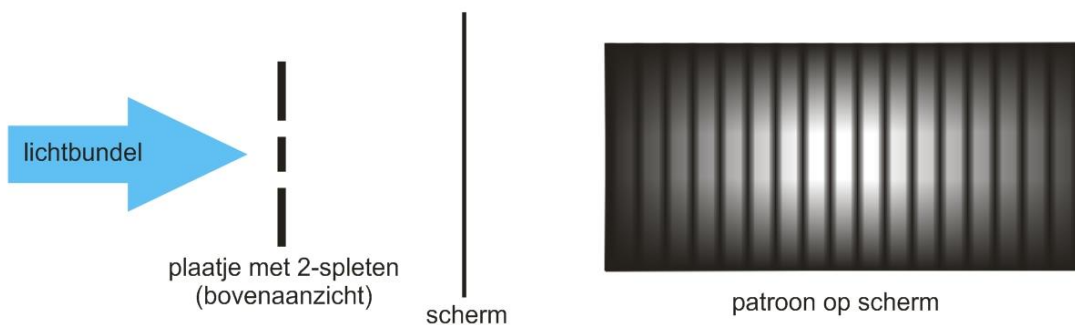
- a Wanneer je praat ben je ook voor mensen die niet recht tegenover je zitten te horen. Leg uit hoe dit kan.
- b Volledige buiging, zoals in de rechter afbeelding hieronder, treedt alleen op als de opening veel kleiner is dan de golflengte van de opvallende golf. Toon aan de hand van de afbeelding hieronder aan dat dit hier het geval is.
- c Myrthe en Karen schijnen met een laserpointer op een klein gaatje wat ze met een speld in een stukje aluminiumfolie hebben geprikt. Ze zien achter het gaatje een piepklein lichtvlekje verschijnen. Er treedt dus geen buiging op. Karen denkt dat dit komt omdat licht uit deeltjes (fotonen) bestaat en omdat buiging alleen bij golven optreedt. Myrthe denkt dat het komt omdat het gaatje niet de goede grootte heeft. Wie heeft er volgens jou gelijk?



## 10 Dubbelspleet

De Engelse natuurkundige Thomas Young voerde begin 19<sup>e</sup> eeuw een experiment uit waarbij aantoonde dat licht een golf is en niet een stroom kleine deeltjes. Als een lichtbundel op twee dunne evenwijdige verticale spleten valt ontstaat op een scherm achter de spleten een patroon van verticale lichte en donkere strepen. Voor zijn originele experiment gebruikte Young een dunne bundel zonlicht. De verticale 'spleten' maakte hij door bundel in het midden te blokkeren. Zo ontstonden effectief twee stroken licht.

- Leg uit hoe met behulp van de golfeigenschappen van licht het ontstaan van het patroon van verticale strepen verklaard kan worden.
- Als we dit experiment vandaag de dag herhalen met een laser en 'echte' verticale spleten waar het licht doorheen valt is het patroon veel duidelijker zichtbaar. Geef twee redenen waarom het patroon veel scherper en duidelijker zichtbaar is.

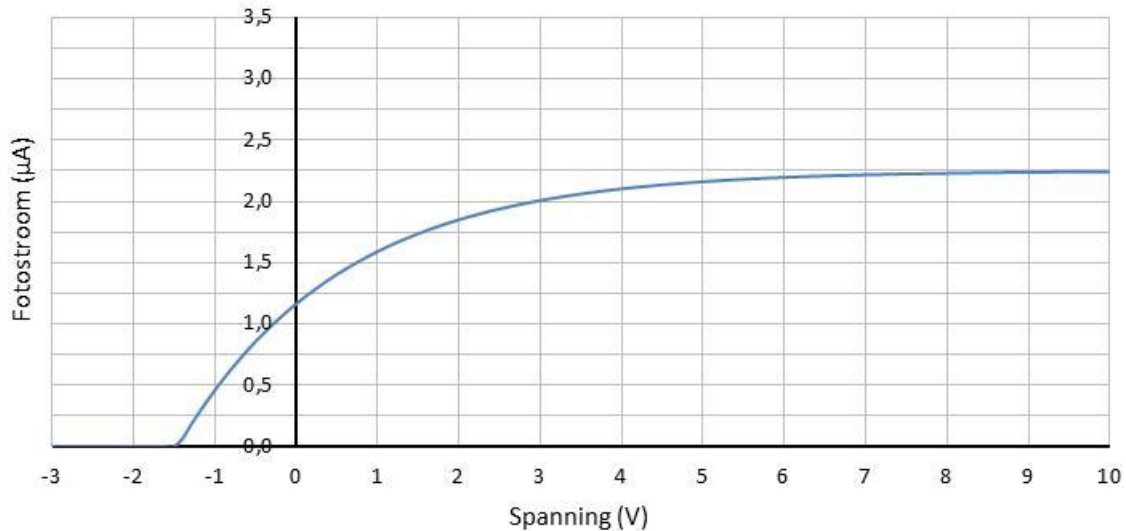


## 11 Foto-elektrisch effect

Op een foto-elektrische cel gemaakt van Cesium valt UV-straling met een golflengte van 365 nm. Bij verschillende externe spanningen is gemeten hoe de foto-stroom verandert. In de grafiek hieronder staat de (I,U)-karakteristiek van de fotocel.

- Bereken de fotonenergie van het opvallende licht in elektronvolt (eV).
- Bepaal het verschil tussen de fotonenergie van het opvallende licht en de uittree-energie van Cesium (Cs). Gebruikt hiervoor BINAS tabel 24.
- Laat zien dat de remspanning, de minimale spanning die nodig is om de fotostroom op 0 te krijgen, in overeenstemming is met het antwoord op de vorige vraag.

- d Teken in het diagram hieronder de (I,U)-karakteristiek die zou ontstaan als er groen licht met  $\lambda = 540 \text{ nm}$  met dezelfde intensiteit op de fotocel zou vallen.
- e Het foto-elektrisch effect is een verschijnsel wat eigenlijk alleen goed verklaarbaar is door aan te nemen dat licht bestaat uit een stroom deeltjes (fotonen) met een vaste energie-inhoud, die bepaald wordt door de golflengte van het licht. Eigenlijk is dit heel raar: Een energiepakketje (deeltje) waarvan de energie afhankelijk is van de golflengte (een eigenschap die alleen bij golven voorkomt). Is licht nou een golf of een deeltje?



## 12 Foto-elektronen

Bepaal in elk van onderstaande situatie of er elektronen worden vrijgemaakt en zo ja wat de kinetische energie van de elektronen is.

- Licht met  $\lambda = 600 \text{ nm}$  valt op een oppervlak van cadmium (Cd).
- Licht met  $\lambda = 298 \text{ nm}$  valt op een oppervlak van gallium (Ga).
- Licht met  $\lambda = 480 \text{ nm}$  valt op een oppervlak van kalium (K).

## 13 Golf/deeltjes-dualiteit

Licht heeft een zogenaamd "dual karakter". Dit betekent dat licht zowel een golf als een deeltje is. Sommige eigenschappen van licht laten zich beter verklaren door aan te nemen dat licht een golf is. Andere eigenschappen zijn beter te verklaren door aan te nemen dat licht uit een stroom energiepakketjes (fotonen) bestaat. Bepaal bij elk van onderstaande eigenschappen of ze horen bij het golfkarakter of het deeltjeskarakter van licht.

- Licht vertoont interferentie
- Wanneer licht van een bepaalde kleur op een metaal valt kan het elektronen vrij maken.
- Een atoom absorbeert alleen licht van bepaalde kleuren.
- Wanneer licht op een opening valt die kleiner is dan de golflengte gaat het niet rechtdoor maar wordt het licht afgebogen (buiging).

## 14 Brogliegolven

De Fransman Louis de Broglie kwam op het idee dat niet alleen licht maar alle deeltjes in principe golfeigenschappen zouden kunnen hebben. Volgens de Broglie hangt de golflengte van een vrij bewegend deeltje af van de impuls van een deeltje die weer afhangt van de massa en de snelheid van het deeltje volgens onderstaande formule. Bepaal de golflengte van de onderstaande deeltjes.

- Een elektron met een snelheid van  $2,3 \cdot 10^4 \text{ ms}^{-1}$ .
- Een heliumkern (massa = 4u) met een snelheid van  $8000 \text{ ms}^{-1}$
- Een auto met een massa van 2300 kg met een constante snelheid van 100 km/h.

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

$$p = m \cdot v$$

$\lambda$  = golflengte (m)

h = constante van Planck (BINAS tabel 7)

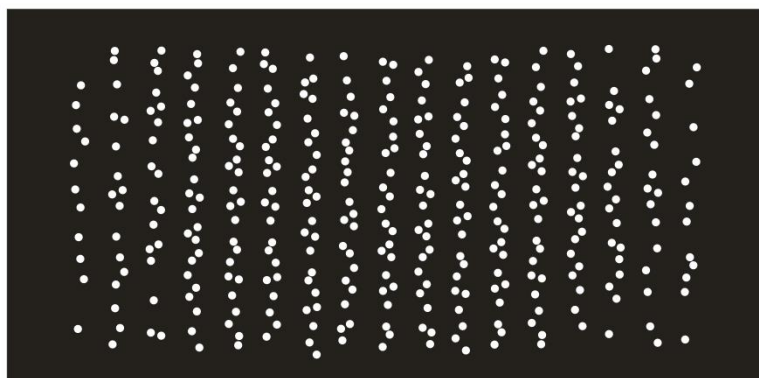
p = impuls ( $\text{kg} \cdot \text{ms}^{-1}$ )

m = massa (kg)

v = snelheid ( $\text{ms}^{-1}$ )

## 15 Dubbelspleet elektronen

In 1961 is het voor het eerst gelukt om het dubbelspleetexperiment van Young te herhalen met een elektronenbundel in plaats van een lichtbundel. Hieronder staat een weergave van het scherm waar de elektronen op terecht kwamen. Elk stipje stelt een plaats voor waar een elektron het scherm geraakt heeft. Duidelijk is een strepenpatroon zichtbaar, vergelijkbaar met het interferentiepatroon wat zou zijn ontstaan als licht i.p.v. elektronen gebruikt zou zijn. Toch was niet iedereen overtuigt van het golfkarakter van elektronen. Sceptici dachten dat het patroon ontstond doordat individuele elektronen in de bundel tegen elkaar aan botsen en zo de richting van elkaars baan veranderen. In 1974 is het experiment herhaald waarbij er steeds maar één elektron tegelijk afgevuurd werd. Na een lange tijd bleek uiteindelijk toch hetzelfde patroon van lichte en donkere strepen te ontstaan. Leg uit dat de deeltjestheorie eigenlijk onhoudbaar werd.



## 16 Golf of deeltje

Of de golfeigenschappen van een deeltje merkbaar worden hangt af van de verhouding tussen de golflengte van het deeltje en de afmetingen van de voorwerpen waarmee het deeltje in aanraking komt. Als de golflengte van dezelfde orde van grootte is of groter dan deze afmetingen kun je verschijnselen verwachten die alleen bij golven optreden zoals interferentie en buiging. Als de golflengte veel kleiner is dan deze afmetingen zal het deeltje zich als een gewoon deeltje gedragen.

- Een knikker met een massa van 10 g schiet met een snelheid van  $12 \text{ ms}^{-1}$  door een gat met een diameter van 5,0 cm. Toon met een berekening aan dat er geen golfeigenschappen te verwachten zijn.
- Elektronen schieten met een snelheid van  $8,0 \cdot 10^4 \text{ ms}^{-1}$  door een spleet met een breedte van 1,0 mm. Toon met een berekening aan dat ook hier geen golfeigenschappen te verwachten zijn.
- Als de breedte van de spleet uit de vorige vraag kleiner gemaakt wordt zullen er op een gegeven moment wél golfeigenschappen optreden. Bereken bij welke spleetbreedte deze eigenschappen merkbaar worden.
- Hoe zullen de golfeigenschappen van de elektronen merkbaar worden? Neem aan dat de elektronen in één rechte stroom op de spleet afgevuurd worden en dat achter de spleet gemeten wordt waar de elektronen terechtkomen.

## 17 Luchtdeeltjes

Een gas wordt over het algemeen opgevat als een grote verzameling moleculen die kriskras door elkaar bewegen. Bij kamertemperatuur bedraagt de gemiddelde grootte van de snelheid  $5,0 \cdot 10^2 \text{ ms}^{-1}$ .

- Bereken de gemiddelde Broglie-golflengte van luchtmoleculen bij kamertemperatuur. Ga hierbij uit van een gemiddelde massa van 28,97 u per molecuul.
- In één  $\text{m}^3$  lucht bevinden zich bij kamertemperatuur in normale omstandigheden  $2,5 \cdot 10^{25}$  moleculen. Laat met een berekening zien dat er per molecuul een volume beschikbaar is ter grootte van een kubusje met zijden van  $3,4 \cdot 10^{-9} \text{ m}$ .
- Leg met behulp van de Broglie-golflengte en de onderlinge afstanden tussen de moleculen uit dat er geen quantumeffecten te verwachten zijn en dat de moleculen gewoon als deeltjes opgevat mogen worden.

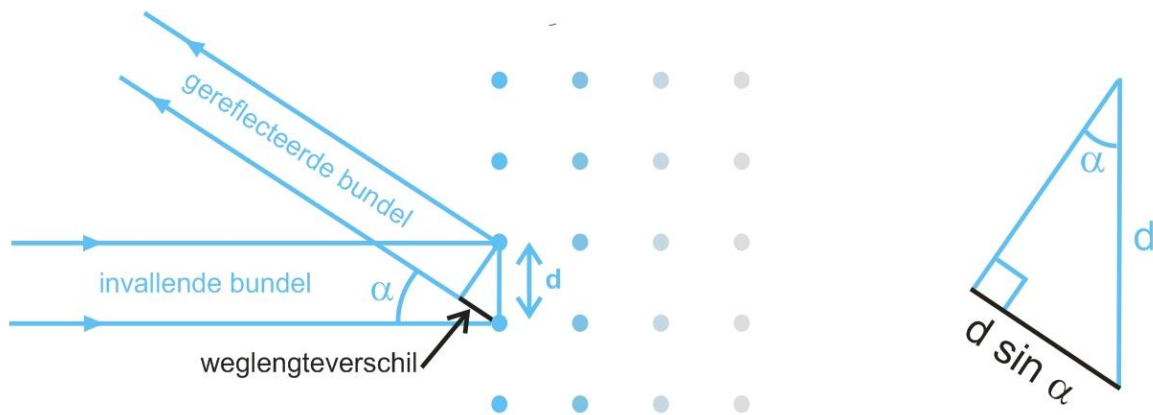
## 18 Elektronendiffractie

Elektronendiffractie is een techniek die gebruikt bij onderzoek naar de atomaire structuur van materialen. Met een elektronenkanon wordt een bundel elektronen gemaakt met een snelheid van  $9,4 \cdot 10^5 \text{ ms}^{-1}$  en op het materiaal afgestuurd. Het materiaal bestaat uit in een kristalstructuur gerangschikte atomen op een onderlinge afstand  $1,2 \cdot 10^{-9} \text{ m}$ .

- Toon met een berekening aan dat er golfverschijnselen te verwachten zijn.



- b De bundel valt loodrecht op het oppervlak en blijkt slechts onder bepaalde hoeken weerkaatst te worden. In de afbeelding hieronder staat een verklaring. De elektronen dringen niet in het materiaal door maar weerkaatsen aan de eerste laag. De bundel in een bepaalde richting is de optelsom van de golven afkomstig van de verschillende atomen in het materiaal die met elkaar interfereren. Of er constructieve of destructieve interferentie zal plaatsvinden hangt af van het weglengteverschil tussen de golven. Leg uit waarom er alleen constructieve interferentie zal plaatsvinden als het weglengteverschil nul is óf als het faseverschil precies een héél aantal golflengtes is.
- c Leidt onderstaande formule af met behulp van de tekening.
- d Wat is de kleinste hoek waaronder de golf wordt gereflecteerd?
- e Met behulp van elektronendiffractie wordt een materiaal met een onbekende structuur onderzocht. Bij een elektronensnelheid  $2,0 \cdot 10^6 \text{ ms}^{-1}$  blijkt de kleinste hoek waaronder de golven weerkaatst worden  $32^\circ$  te zijn. Bereken de afstand tussen de atomen van dit materiaal.



$$d \cdot \sin \alpha = n \cdot \lambda$$

$d$  = afstand tussen atomen (m)

$\alpha$  = afbuighoek

$n = 0, 1, 2, 3, \dots$

$\lambda$  = golflengte (m)

### 19 Deeltje in een doos

Voor een deeltje dat geen krachten ondervindt en zich onbeperkt in een bepaalde richting kan verplaatsen wordt de golflengte gegeven door de formule van de Broglie. Als het deeltje zit opgesloten gelden er beperkingen voor deze golven. Slechts bepaalde golven zijn mogelijk. Een voorbeeld is een deeltje opgesloten in een doosje. Hiervoor geldt dat er precies een héél aantal halve golflengtes in de doos moeten passen.

- a Leg uit waarom het gedrag van een deeltje in een doos vergelijkbaar is met staande golven in een snaar.
- b Voor een deeltje in een doos zijn, vanwege een beperking in de mogelijke golflengtes, alleen een beperkt aantal energieën mogelijk. In een denkbeeldige eendimensionale doos

geldt onderstaande formule. Bereken  $E_2$  voor een elektron opgesloten in een ruimte van  $7,0 \cdot 10^{-10}$  m.

- c Het elektron in het doosje valt terug van de eerste aangeslagen toestand ( $n=2$ ) naar de grondtoestand ( $n=1$ ). Hierbij wordt een foton uitgezonden. Bepaal met een berekening de kleur licht die hierbij wordt uitgezonden.
- d Een elektron opgesloten in een kleine ruimte lijkt op de situatie binnen een atoom. Leg uit dat ook het ontstaan van spectraallijnen bij atomen met dit model goed verklaard kan worden.

$$E_n = \frac{n^2 h^2}{8mL^2}$$

$E_n$  = toegestane energie (J)

$n = 1, 2, 3, \dots$

$h$  = constante van Planck (BINAS tabel 7)

$m$  = massa deeltje (kg)

$L$  = lengte doosje (m)

## 20 Waterstofatoom

Een elektron in een waterstofatoom is vergelijkbaar met een deeltje in een doosje. Ook hier zijn voor het elektron maar een beperkt aantal energieën mogelijk. Wanneer we het ionisatieniveau op 0 eV definiëren geldt voor een waterstofatoom onderstaande formule.

- a Laat zien dat voor het hoogste energieniveau ( $n=\infty$ ) de energie 0 eV is.
- b In BINAS tabel 21A staat het energiediagram van het waterstofatoom. Helemaal links staat de energieschaal zoals gebruikt in de formule. Daarnaast staat een schaal waarbij het grondniveau als 0 eV is gedefinieerd. Leg uit waarom het voor de spectraallijnen niet uitmaakt welke definitie van energie gebruikt wordt.
- c In de tabel is af te lezen dat  $E_5$  (de energie behorende bij  $n=5$ ) gelijk is aan 13,0560 eV ten opzichte van de grondtoestand. Bereken  $E_6$ .
- d Bereken de golflengte van de spectraallijn behorend bij de overgang van  $n=5$  naar  $n=6$ . Wat voor soort straling is dit?

$$E_n = -\frac{13,6}{n^2}$$

$E_n$  = toegestane energie (eV)

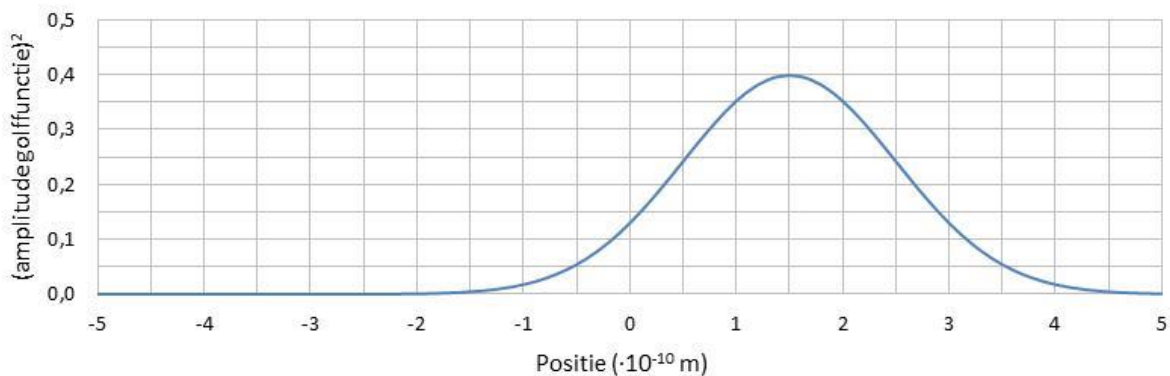
$n = 1, 2, 3, \dots$

## 21 Waarschijnlijkheid

Het kwadraat van de amplitude van een golf op een bepaalde positie is een maat voor de kans om een deeltje op die positie aan te treffen bij een meting. De golven waar we het in de quantummechanica over hebben moeten dan ook geïnterpreteerd worden als waarschijnlijkheidsverdelingen. In de grafiek hieronder staat het kwadraat van een golf functie weergegeven als functie van de positie van een elektron.

- a Bij welke positie is de kans het grootst om het elektron bij een meting aan te treffen?

- b Bepaal uit de grafiek hoe groot is de kans is om het elektron bij een meting op een positie kleiner dan  $1,0 \cdot 10^{-10}$  m aan te treffen.
- c Laat zien dat de kans kleiner dan 1 % is om het elektron aan te treffen op een positie tussen de  $4,0 \cdot 10^{-10}$  m en  $5,0 \cdot 10^{-10}$  m.
- d Als je van een quantumdeeltje de positie bepaalt d.m.v. een meting is de positie van het deeltje bekend. De waarschijnlijkheidsverdeling is op dat moment geen waarschijnlijkheidsverdeling meer: De positie is immers bekend en geen kans meer. Een quantumdeeltje blijkt bij een meting ook écht opeens op te houden met “golf zijn” en wordt een klassiek deeltje. Hoe een quantumdeeltje zich gedraagt hangt dus af van het feit of het deeltje wordt gemeten of niet. Het deeltje “weet” als het ware of het gemeten wordt of niet. Dit ging tegen het gezond verstand van veel natuurkundigen in en het heeft dan ook lang geduurd voordat de quantummechanica ook echt algemeen geaccepteerd werd. Leg uit waarom veel natuurkundigen hier een probleem mee hadden.



## 22 Schrödinger's kat

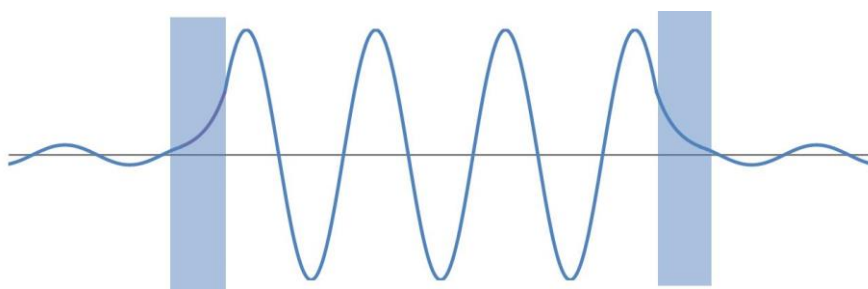
Om aan te tonen hoe onlogisch de quantummechanica is, is door de Oostenrijkse natuurkundige Schrödinger het onderstaande gedachtenexperiment bedacht. Leg uit wat de analogie van dit gedachtenexperiment is met de quantummechanica.

*Een kat zit in een gesloten doos samen met een mechanisme dat een giftig gas laat vrijkomen waardoor de kat meteen (pijnlijk) overlijdt. Het mechanisme is zo afgesteld dat door middel van een proces met quantumdeeltjes door toeval bepaald wordt of het gas vrijkomt of niet. Aan de buitenkant van de doos is niets van de binnenkant te zien. Zolang de doos niet geopend wordt moet je er als waarnemer vanuit gaan dat de kat zich in een soort “tussentoestand” tussen leven en dood bevindt. De kat is zowel levend als dood. Pas als de doos geopend om te kijken of de kat leeft of niet wordt de toestand van de kat definitief en houdt de kat op met zich in de tussentoestand te bevinden. Aangezien pas bij het openen van de doos zekerheid wordt verkregen is het ook het openen van de doos wat de kat de das om doet of niet.*

## 23 Tunneleffect

Een balletje ligt op de bodem van een put. Om uit de put te ontsnappen moet het balletje eerst omhoog. Als de hoogte van het deeltje hoog genoeg is kan het deeltje over de rand heen komen en kan het balletje ontsnappen. De zwaarte-energie van het balletje moet dus toenemen tot een bepaalde waarde. De wand vormt dus een energie-barrière die het balletje verhindert te ontsnappen.

- De kinetische energie van het balletje is kleiner dan de energie-barrière die de wand vormt. Leg met de wet van behoud van energie uit dat een klassiek deeltje nooit uit de put zal kunnen ontsnappen.
- Een  $\alpha$ -deeltje met een energie van 23 eV zit opgesloten in een in een put met een lengte van  $1,0 \cdot 10^{-11}$  m. Laat met een berekening zien dat er in dit geval golfverschijnselen te verwachten zijn. Gebruik hierbij onderstaande formule.
- De barrière die het  $\alpha$ -deeltje moet overwinnen om te kunnen ontsnappen is groter dan 23 eV. Een klassiek deeltje zal dus nooit kunnen ontsnappen. Leg uit aan de hand van de afbeelding hieronder uit dat het  $\alpha$ -deeltje wél kan ontsnappen dankzij het tunneleffect.



$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2 \cdot E \cdot m}}$$

$\lambda$  = golflengte (m)

$h$  = constante van Planck (BINAS tabel 7)

$E$  = energie (J)

$m$  = massa (kg)

## 24 Ontsnappingskans

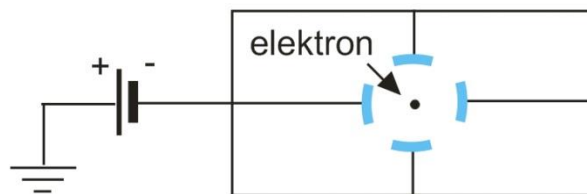
Een quantumdeeltje bevindt zich in een energieput. De energie van het deeltje is lager dan de hoogte van de barrière. Dankzij het tunneleffect is er een kleine kans dat het deeltje uit de energieput ontsnapt. In welk van de onderstaande situaties is de kans het grootst dat het deeltje ontsnapt? Ga er hierbij vanuit dat het deeltje zich in alle situaties in de grondtoestand bevindt ( $n=1$ ).



## 25 Heisenberg

Voor een quantumdeeltje geldt er een fundamentele ondergrens aan de nauwkeurigheid waarmee de plaats en de impuls ( $p=m \cdot v$ ) berekend kunnen worden. Dit wordt duidelijk uit de zogenaamde onzekerheidsrelatie van de Duitse natuurkundige Werner Heisenberg (zie onder). Met behulp van een elektrisch veld wordt een elektron gevangen gehouden in een piepklein gebiedje.

- Laat zien dat de eenheden aan beide kanten van het  $\geq$  teken gelijk zijn.
- Leg aan de hand van de onzekerheidsrelatie van Heisenberg uit dat het onmogelijk is om de precieze plaats van het elektron te weten en onmogelijk is om de precieze snelheid van het elektron te weten.
- Voorspel wat er gebeurt als het gebiedje waarin het elektron zit opgesloten kleiner gemaakt wordt.



$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{h}{4\pi}$$

$\Delta x$  = onzekerheid plaats (m)

$\Delta p$  = onzekerheid impuls ( $\text{kgms}^{-1}$ )

$h$  =constante van Planck (BINAS tabel 7)

## 26 Nulpuntsenergie

De gemiddelde kinetische energie van moleculen in een stof hangt af van de temperatuur. Hiervoor geldt onderstaande formule.

- Laat met een berekening zien dat de gemiddelde kinetische energie van de moleculen bij kamertemperatuur ( $20^\circ\text{C}$ )  $6,07 \cdot 10^{-21}$  J bedraagt.
- Bereken de gemiddelde grootte van de snelheid van de moleculen in een glas water bij kamertemperatuur. Gebruik hierbij de formule  $E_{\text{kin}} = \frac{1}{2}mv^2$  en ga uit van een molecuulmassa van water van 18u.
- Wat is gemiddelde grootte van de snelheid bij het absolute nulpunt (0 K)?
- Bij kamertemperatuur zit er een grote spreiding in de snelheden van de individuele watermoleculen. Er zullen moleculen zijn die sneller bewegen en moleculen die langzamer bewegen. Beredeneer waarom er bij het absolute nulpunt nul geen spreiding is in de snelheid van afzonderlijke moleculen is en dat de snelheid voor alle moleculen hetzelfde is. (Bedenk hierbij dat de grootte van de snelheid nooit negatief kan worden).
- De klassieke theorie is dat moleculen stilstaan bij het absolute nulpunt. Leg aan de hand van de onzekerheidsrelatie van Heisenberg uit dat dit nooit kan gelden voor quantumdeeltjes en dat er altijd een zogenaamde nulpuntsenergie over blijft.

$$E_{kin,gem} = \frac{3}{2} \cdot k_B \cdot T$$

$E_{kin,gem}$  = gemiddelde kinetische energie (J)

$k_B$  = constante van Boltzmann (BINAS tabel 7)

T = temperatuur (K)

## 27 Omschrijvingen

Hieronder staan een aantal omschrijvingen van natuurkundige termen. Leg bij elke omschrijving uit welk woord hierbij hoort. Kies uit: *aangeslagen*, *Bohrmodel*, *gequantiseerd*, *quantumfysica*, *dubbelspleetexperiment*, *elektronvolt*, *tunneleffect*, *foto-elektrisch effect*, *klassiek deeltje*, *fotonen*, *quantumdeeltje*, *grondtoestand*, *nulpuntsenergie*.

- Eenheid van energie.
- Deeltje met een duidelijk gedefinieerde plaats en een snelheid.
- Deeltje met zowel golfeigenschappen als deeltjeseigenschappen.
- Wanneer van een grootheid niet alle waarden zijn toegestaan is de grootheid .....
- Lichtdeeltjes heten ook wel....
- Laagst mogelijke energie van een vrij quantumdeeltje.
- Tak van natuurkunde die zich bezighoudt met het golfkarakter van deeltjes.
- Toont het deeltjeskarakter van licht aan.
- Een elektron in een niveau hoger dan de grondtoestand heet...
- Situatie met laagst mogelijke energie van een elektron in een atoom.
- Verklaart het optreden van spectraallijnen bij atomen.
- Toont het golfkarakter van licht én van elektronen aan.
- Quantumdeeltje kan door een energiebarrière heen ondanks een te lage energie.

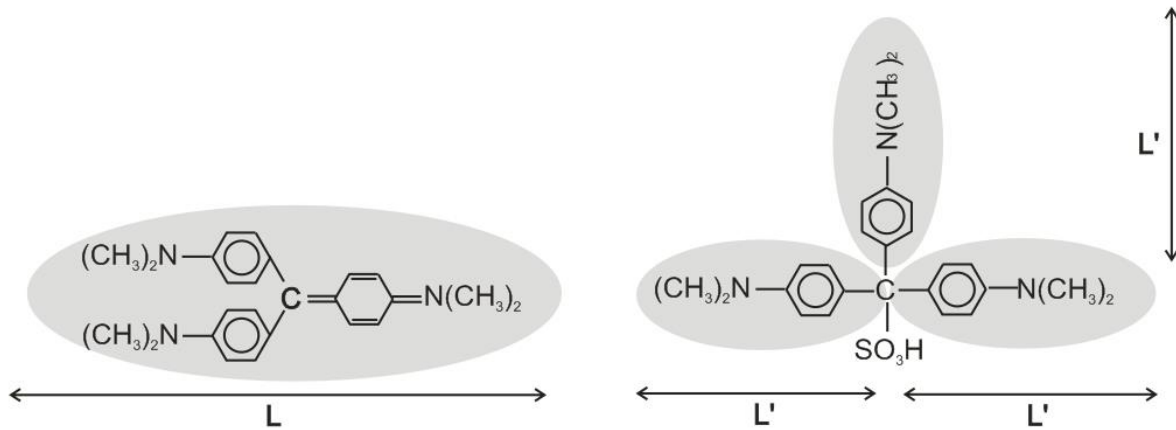
## 28 Inktwisser

In de afbeelding hieronder zie je links de molecuulstructuur van vulpeninkt. Een elektron kan zich vrij bewegen door het hele molecuul. Het molecuul kan daarom opgevat worden als een energieput met lengte L (het grijze gebied in de afbeelding). De overgang van de grondtoestand van dit elektron naar de eerste aangeslagen toestand komt overeen met de energie van een foton met  $\lambda = 550$  nm. Hierdoor krijgt de inkt zijn kleur: De inkt absorbeert deze kleur en laat andere kleuren ongemoeid.

- a Met welke kleur correspondeert een golflengte van 550 nm?
- b Bereken de fotonenergie behorende bij deze golflengte.
- c Bereken uit de geabsorbeerde golflengte de lengte L van de energieput.
- d Met een speciale inktwisser kan de vulpeninkt onzichtbaar gemaakt worden. De stof in de inktwisser zorgt voor een reactie waardoor het molecuul verandert in het molecuul in de afbeelding rechts. In dit molecuul kan het elektron niet meer langs het centrale C-atoom. Dit molecuul kan dus opgevat worden als een samenstelling van meerdere kleinere

energieputten. De lengte van de nieuwe energieputten ( $L'$ ) is gehalveerd ten opzichte van de lengte van de oorspronkelijke energieput. Laat met een berekening zien dat het energieverval tussen de grondtoestand en de eerste aangeslagen toestand hierdoor 4 keer zo groot wordt.

- e Bereken de golflengte die hoort bij de overgang van de grondtoestand naar de eerste aangeslagen toestand in de "gewiste" toestand.
- f Leg uit waarom de gewiste vulpeninkt kleurloos en dus onzichtbaar is.



## ANTWOORDEN VAN DE REKENOPGAVEN

Uitwerkingen en uitleg van alle opgaven zijn te vinden op [natuurkundeuitgelegd.nl/uitwerkingen](http://natuurkundeuitgelegd.nl/uitwerkingen)

### 1 Laserpointer

- a  $3,13 \cdot 10^{-19}$  J
- b  $1,6 \cdot 10^{16}$

### 4 Energieniveaus

- a 590 nm
- b 272 nm
- c  $1,16 \cdot 10^3$  nm
- d 221 nm

### 5 Aangeslagen toest.

- a  $n=4$
- b 4
- c 6

### 6 Lijnenspectrum

- a 10

### 7 Waterstofspectrum

- a Lyman
- b 13,2 eV
- c 93,1 nm
- d  $7,65 \cdot 10^3$  nm

### 11 Fotoelektrisch eff.

- a 3,40 eV
- b 1,46 eV

### 12 Fotoelektronen.

- a geen elektr.
- b 0 J / 0 eV
- c 0,33 eV /  $5,3 \cdot 10^{-20}$  J

### 14 Brogliegolflengte

- a 32 nm
- b  $1,2 \cdot 10^{-11}$  m
- c  $1,04 \cdot 10^{-38}$  m

### 16 Golf of deeltje

- c  $\approx 10$  nm

### 17 Luchtdeeltjes

- b  $2,8 \cdot 10^{-11}$  m

### 18 Elektr.diffRACTIE

- d  $40^\circ$
- e 0,69 nm

### 19 Deeltje in doosje

- b  $4,9 \cdot 10^{-19}$  J
- c groen

### 20 Waterstofatoom

- c 13,2 eV
- d  $7,46 \cdot 10^3$  nm

### 21 Waarschijnlijkheid

- a  $1,5 \cdot 10^{-10}$  m
- b 31%

### 24 Ontsnappingskans

- a D

### 26 Nulpuntsenergie

- b  $6,4 \cdot 10^2$  ms<sup>-1</sup>
- c 0 ms<sup>-1</sup>

### 28 Inktwisser

- a groengeel
- b  $3,61 \cdot 10^{-19}$  m
- c  $7,07 \cdot 10^{-10}$  m
- e 138 nm