

MENS

MILIEU EDUCATIE NATUUR SAMENLEVING

89

Populairwetenschappelijk tijdschrift
Driemaandelijks | OKT-NOV-DEC 2013



Kwantummechanica

de wereld op zijn kop



Beste MeNS lezer,

In dit nummer dalen we samen af naar het rijk van de atomen. Maar hebben we er enig idee van hoe groot een atoom eigenlijk wel is?

Laten we even een vergelijking maken. Er zijn ongeveer 100 miljard sterren in ons melkwegstelsel, en men raamt het aantal sterrenstelsels in het heelal eveneens van de orde van 100 miljard. Dus is het totaal aantal sterren van de grootteorde van een getal met 22 nullen. Maar dit getal is nog steeds kleiner dan het getal van Avogadro met 23 nullen. Dat betekent dat bijvoorbeeld 1 gram silicium meer atomen bevat dan er sterren zijn in het heelal. En dus kan het afdalen in die wereld even boeiend zijn als de exploratie naar de uiteinden van het universum.

Reeds in 1959 gaf de latere Nobelprijswinnaar en visionair Richard Feynman een zeer opmerkelijke lezing onder de titel: *"There's Plenty of Room at the Bottom - An Invitation to Enter a New Field of Physics"*.

"Wanneer we die zeer kleine wereld betreden dan merken we plots dat de atomen zich niet meer gedragen volgens de klassieke wetmatigheden van onze dagelijkse wereld. Ze volgen de wetten van de kwantummechanica.

VOORWOORD

En nieuwe wetten geven ook mogelijkheden om nieuwe dingen te maken...Ik durf zelfs de vraag stellen of we ooit atomen één voor één zouden kunnen stapelen op de plaats waar wij het zelf willen..."

Feynman heeft het niet meer mogen meemaken, maar de dag van vandaag is zijn droom werkelijkheid geworden. Met moderne elektronenmicroscopen slaagt men er in individuele atomen zichtbaar te maken, een prestatie die vergelijkbaar is met het waarnemen van ping-pongballetjes op het maanoppervlak. Sterker nog, men slaagt er zelfs in individuele atomen te verplaatsen en daarmee nieuwe structuren te maken met nieuwe eigenschappen. Dus als het ware opbouwen van onderuit. Dat is het terrein van de nanotechnologie.

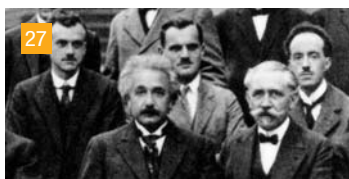
In dit nummer van MeNS verkennen we samen dat onbekend terrein. De kwantummechanica is daarbij onze handleiding. Maar het is een hele uitdaging om kwantummechanica uit te leggen zodat een leek die kan begrijpen. Immers, zelfs Richard Feynman zei daarover in 1965: "Ik kan gerust stellen dat niemand eigenlijk kwantummechanica begrijpt".

Toch is MeNS die uitdaging aangegaan. Aan jullie om te oordelen.

Prof. Dr. Dirk Van Dyck

Dirk Van Dyck is gewoon hoogleraar Fysica aan de Universiteit Antwerpen en bekleedde er de positie van vice-rector Onderzoek van 2004 tot 2008. Als oprichter van het "Visielab" is hij gespecialiseerd in digitale beeldverwerking en patroonherkenning. In 2000-2001 werd hij laureaat van de binnenlandse Francqui leerstoel.

Inhoud



Van wolkje tot donderslag bij een heldere hemel	2
Over golven en deeltjes	5
Over superpositie en ineenstortende katten	12
Navigeren door de kwantumwereld: waar ben ik?	19
Intermezzo - Plato en de kwantumwereld	21
De zee (en de zoo) van elementaire deeltjes	23
Brussel, 1927: Daar gaan de zekerheden	27

Kwantummechanica

de wereld op zijn kop

Prof. Dr. Geert Potters (Hogere Zeevaartschool/Universiteit Antwerpen),
met medewerking van Prof. Dr. Dirk Van Dyck en Prof. Dr. Jacques Tempere (Universiteit Antwerpen).

Denk je een wereld in waar het onmogelijk is om te weten waar je je bevindt, maar waar je je van het ene moment op het andere kan verplaatsen naar een verre bestemming. Een wereld waarin je dwars doorheen een muur kan gaan en aan beide zijden tegelijk kan bestaan. Een wereld waarin het feit dat je een meting uitvoert, het resultaat van die meting doet veranderen. En, ten slotte, een wereld waarin alles mogelijk is, tot de boel instort en er slechts één werkelijkheid overblijft.

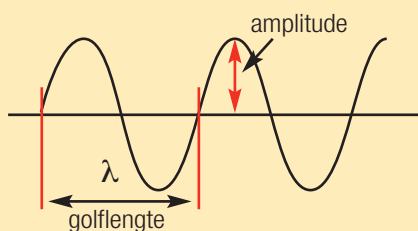
Onmogelijk? Sciencefiction? Niets is minder waar. Dit zijn allemaal fenomenen die het gevolg zijn van zeer goed onderzochte natuurwetten, die in talloze theoretische bespiegelingen en in nog meer experimentele situaties hun geldigheid keer op keer bewijzen. Het zijn de wetten die we vooral leren kennen wanneer we het gedrag van atomen en subatomaire deeltjes bestuderen: niet dat ze niet geldig zijn op "onze schaal", maar daar hebben we eenvoudiger wetten voor (die wiskundig gezien vaak speciale gevallen

zijn van de kwantumwetten): de gewone klassieke mechanica. Hier en daar zullen we het verband tussen de wereld van de subatomaire deeltjes en onze eigen leefwereld wel wat meer in de verf zetten.

Je merkt al meteen dat we niet altijd op onze intuïtie zullen kunnen terugvallen. Meer nog - zelfs een echte specialist, Richard Feynman, de Nobelprijswinnaar voor Fysica in 1965, zei over de kwantummechanica: "I think I can safely say that nobody understands quantum mechanics." Het wordt dus voor ons, de MeNS-redactie, ook een hele uitdaging om kwantummechanica uit te leggen zodat een leek het kan begrijpen. Maar die uitdaging gaan we graag aan. Houd je elektronen goed vast, daar gaan we.

The human understanding is like a false mirror, which, receiving rays irregularly, distorts and discolors the nature of things by mingling its own nature with it.

Francis Bacon



h = constante van Planck

$\hbar = h/2\pi$

E, W = energie

m = massa

v = snelheid

c = lichtsnelheid

e = lading van het elektron

p = impuls ($m \cdot v$)

V = potentiële energie

ν = frequentie (aantal golven per seconde)

Voor meer info over golven: zie MeNS 86, Gehoor

Van wolkje tot donderslag bij heldere hemel

We beginnen ons verhaal aan het einde van de negentiende eeuw. De mechanica van Newton had al lang haar bruikbaarheid bewezen, Maxwell had net met zijn wetten het elektromagnetisme onderbouwd, en de thermodynamica bloeide als nooit tevoren dankzij de vele industriële toepassingen die het licht zagen. De fysica was een vredig wetenschapsdomein. Zo vredig zelfs, dat de beroemde fysicus Sir William Thompson, Lord Kelvin (1824-1907), er in een van zijn lezingen (getiteld *Nineteenth-Century Clouds over the Dynamical Theory of Heat and Light*) op wees, dat er nog slechts enkele “wolkjes” overbleven die nog moesten worden opgelost. Albert Michelson (1852-1931) stelde het nog iets sterker: “De belangrijkste fundamentele wetten en feiten van de fysica zijn nu alle ontdekt, en ze zijn zo stevig onderbouwd dat de kans dat ze ooit door nieuwe ontdekkingen zouden worden opzijgeschoven, bijzonder klein is.”

Dit gegeven was gebaseerd op zes zekerheden:

- Het universum is in feite één reusachtige machine. Complexe gebeurtenissen zijn een samenstelling van eenvoudige gebeurtenissen (ook al kunnen we die niet meteen zelf waarnemen)
- Elke gebeurtenis heeft een oorzaak, en is daar het

gevolg van. Als een voorwerp beweegt, kan de oorzaak van die beweging worden aangewezen. Dit oorzaak-gevolgprincipe ligt besloten in de wetten van Newton.

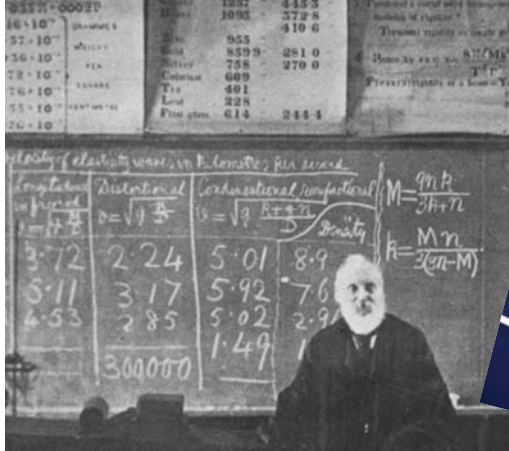
- Het universum is daardoor een deterministische machine: dit wil zeggen dat we perfect kunnen beschrijven hoe die machine er in het verleden uitzag, of in de toekomst er zal uitzien, zolang we maar perfect weten wat de toestand van die machine in het heden is. Met andere woorden: alles is berekenbaar, niets is onzeker.
- De eigenschappen van licht kennen we uit de vergelijkingen van Maxwell. Licht is een fenomeen dat steunt op golven. Dit was inderdaad zo aangetoond door de dubbele-spleetexperimenten van Thomas Young (zie verderop).
- Ofwel bestaat energie als deeltjes, ofwel als golven. Een tussenoplossing is er niet.
- De eigenschappen van een systeem kunnen we met eender welke nauwkeurigheid bepalen.

Deze filosofie staat bekend als het determinisme van Laplace. Het leek erop dat de fysica in staat was om de materiële wereld tot ieders voldoening te beschrijven – en dat was ook de boodschap die de jonge Max Planck, één van de helden van de kwantummechanica, meekreeg van zijn professor, Philipp von Jolly: “De wetenschap is een vrijwel voltooide kennis van de natuur.” Draaide dat even anders uit.

Hommage aan tal van grote breinen

De materie in dit dossier is tot stand gekomen door de gezamenlijke intellectuele inspanning van heel wat bijzonder intelligente mensen. Ze hebben zich met hart en ziel gestort op de zoektocht naar een goede, correcte beschrijving van de fysica van de kwantumwereld. Doorheen het dossier komen hun namen en verwezenlijkingen aan bod.





Lord Kelvin, voor de klas



Kleurenspectrum

De wolkjes van Lord Kelvin

Het eerste wolkje van Kelvin betrof het onverwachte resultaat van een beroemd experiment van Albert Michelson en Edward Morley. Deze twee onderzoekers hadden de handen in elkaar geslagen om meer te weten te komen over de "ether". Dit was een verder onbekende, hypothetische stof, waarvan de wetenschap dacht dat ze overal rondom ons aanwezig was, en diende als medium voor het transport van lichtgolven (net als water diende voor oppervlaktgolven en lucht voor geluidsgolven). In hun ogen mislukte het experiment, omdat ze geen effecten van de ether op de snelheid van het licht konden aantonen. Enkele jaren later werd duidelijk waarom, toen Einstein op de proppen kwam met zijn speciale relativiteitstheorie. Hierin bleek de snelheid van het licht een constante te zijn, waardoor er ook geen nood meer was aan die "ether". Alleszins leidde dit wolkje dus tot een eerste grote radicale omslag in het denken van de natuurkundigen.



Albert Michelson



Edward Morley

Het tweede wolkje bleek al even spectaculair. Op het eerste gezicht lijkt het vraagstuk nochtans bijzonder abstract: hoeveel straling (van elke verschillende golflengte) stuurt een zogenaamd zwart voorwerp uit wanneer dat voorwerp een bepaalde temperatuur heeft. We noemen het voorwerp zwart, wat betekent dat het voorwerp bij een gegeven temperatuur en bij elke denkbare golflengte zoveel mogelijk licht uitstuurt.

We weten dat een voorwerp van kleur verandert naargelang het warmer of kouder wordt. De kleur die het voorwerp krijgt, is daarbij louter afhankelijk van de temperatuur, en niet van het materiaal waaruit het voorwerp bestaat (zie figuur). Denk ook bijvoorbeeld aan het rood opglloeien van hete kolen.

Het licht dat hierbij wordt geproduceerd is bovendien niet enkel rood of blauw, maar een mengsel van alle mogelijke golflengten, waarbij elke golflengte voor een bepaald deel bijdraagt aan het geheel. We noe-



Meer weten?

tinyurl.com/michelson-morley1

tinyurl.com/michelson-morley2

tinyurl.com/michelson-morley3

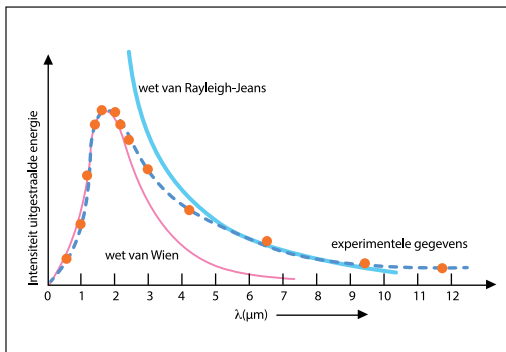
tinyurl.com/michelson1

tinyurl.com/blackbodyphyslet

laat je zelf met spectra bij verschillende temperaturen spelen.



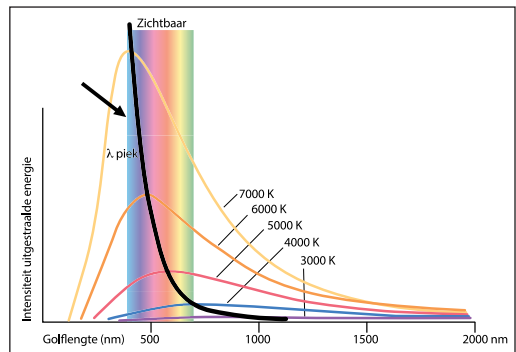
Hete voorwerpen krijgen een kleur - denk maar aan gloeiende kolen, of aan het verband tussen de kleur van een ster en haar temperatuur.



Noch de wet van Rayleigh-Jeans, noch die van Wien konden tot ieders tevredenheid de meetresultaten rond de straling van een zwart lichaam verklaren. Pas toen Planck zijn vergelijking voorstelde (stippellijn) klopte het plaatje. alleen wist niemand waarom.

men dit in de wetenschap een kleurspectrum. We ervaren de finale kleur als rood of blauw omdat in het spectrum rode of blauwe golflengten overheersen. De exacte bijdrage van elke golflengte noemen we de verdeling van het spectrum.

Wetenschappers waren eind van de negentiende eeuw druk bezig om een vergelijking te zoeken die de verdeling van de straling bij een bepaalde temperatuur goed beschreef. Meer nog: er bestonden twee vergelijkingen die bepaalde resultaten van de metingen goed benaderden. Lord Rayleigh en Sir James Jeans waren uitgekomen bij een formule die goed paste bij lage frequenties (lange golflengten).



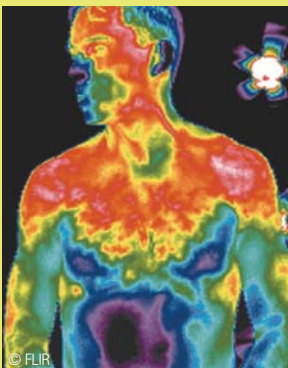
Naarmate de temperatuur van een voorwerp stijgt, wordt de golflengte van de piek van het uitgestraalde licht korter.

Bij kortere golflengten klopte er echter niets van: volgens hun theorie zouden voorwerpen bij eender welke temperatuur hoge dosissen ultraviolet licht uitstralen. En dat klopt (gelukkig voor ons) van geen kanten.

Wilhelm Wien had een vergelijking afgeleid die de meetwaarden goed beschreef bij hoge frequenties (korte golflengten), maar bij lage frequenties lagen de voorspellingen van zijn formule te ver af van de gemeten waarden. En in de experimentele wetenschappen geldt nu eenmaal dat we de theorie aanpassen aan de metingen (en niet andersom). Het was dus wachten op een fysicus die de theorie op de juiste manier zou kunnen bijwerken.

En waarom moeten we dit weten...?

Voor wie zich afvraagt of dergelijke abstracte beschouwingen wel enig nut hebben: hier zijn enkele zeer zinvolle toepassingen waarin onze kennis van de straling van zwarte lichamen wordt gebruikt. Los daarvan is het zo, dat deze beschouwingen en ideeën de wetenschap bijzonder veel vooruitgeholpen hebben. Daarom alleen al is dit (fundamentele) onderzoek van groot belang.



- In de hedendaagse klimaatmodellen worden de zon en de aarde beschreven als zwarte lichamen. Dit blijkt een bijzonder goede benadering te zijn, en zo kunnen we gemakkelijk berekenen wat bv. de aarde aan straling uitstuurt, of wat de atmosfeer aan straling naar de aarde stuurt. Deze berekeningen zijn cruciaal bij het doorrekenen van de opwarming van de aarde.
- Ook wat wij, warmbloedige mensen, uitstralen, is afhankelijk van onze temperatuur, volgens deze stralingswetten. Dit is zelfs zo gevoelig, dat mensen met koorts gemakkelijk met infraroodcamera's kunnen worden opgepikt. Ten tijde van wereldwijde paniek over besmettingen met vogelgriep of SARS werden vliegtuigpassagiers via dergelijke camera's ongezien en ongestoord gecontroleerd bij het inschepen en aankomen.

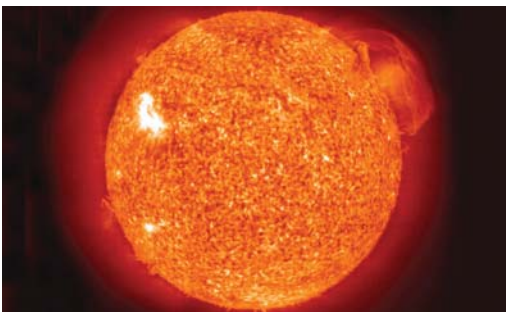
Max Planck en de geboorte van het kwantum

De grote doorbraak in de zoektocht naar een correcte beschrijving van wat een zwart lichaam uitstraalt, kwam er bij de eeuwwisseling. Max Planck stelt eind 1900 immers een bijzonder postulaat voor – een dat hij zelf overigens in eerste instantie beschouwde als een puur formele aanname, zonder er verder echt over na te denken. Hij stelt namelijk dat de energietoestanden van een lichtgolf slechts gehele veelvouden kunnen zijn van een bepaald basisniveau. Dat basisniveau berekent hij door de frequentie ν van die lichtgolf te vermenigvuldigen met een vaste waarde: h , de constante van Planck ($6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$). Wat hij hiermee in het leven roept, is het gegeven dat energie enkel in discrete (aparte) pakketjes kan worden verbruikt, geleverd en doorgestuurd. Een dergelijk pakketje noemt hij een kwantum (van het Latijn quantum, hoeveelheid), met als energie-inhoud $E = h\nu$.

En het resultaat van zijn werk? Een vergelijking die perfect past bij de meetgegevens. Wanneer deze vergelijking voor hoge en lage frequenties wordt vereenvoudigd, blijkt dat de formules tevoorschijn komen die door Wien en door Rayleigh en Jeans waren ontwikkeld.



Max Planck



Planck zelf beschouwde zijn quanta in de eerste plaats als een manier om de vergelijking te laten aansluiten bij de meetgegevens. Hij vermoedde dat er nog wel iemand met het juiste theoretische inzicht op de proppen zou komen, om die discrete energieniveaus beter uit te leggen, en om ze te laten aansluiten bij de klassieke fysica.

Over golven en deeltjes

Even terug in de tijd. In de zeventiende en achttiende eeuw woedde er onder de natuurwetenschappers een hevig debat omtrent de aard van licht. De grote opponenten waren enerzijds Isaac Newton (1642-1727), die het standpunt verdedigde dat licht moest bestaan uit individuele deeltjes, en anderzijds Christiaan Huygens (1629-1695), die licht als een golf fenomeen aanzag. Pas door het beroemde dubbele-spleetexperiment van Thomas Young kon aan het begin van de negentiende eeuw ontegensprekelijk worden aangetoond dat licht een golf was. Een experiment dat best wel wat aandacht verdient.

De interferentiepatronen van Young

Young bestudeerde wat er gebeurt als twee lichtgolven op eenzelfde punt inwerken. De beweging van golven kunnen we ons het best voorstellen door bij-



Isaac Newton

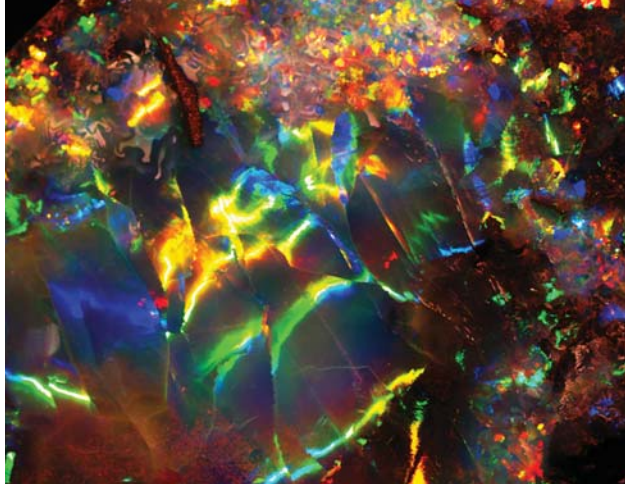


Christiaan Huygens



Thomas Young





Interferentie in opaal

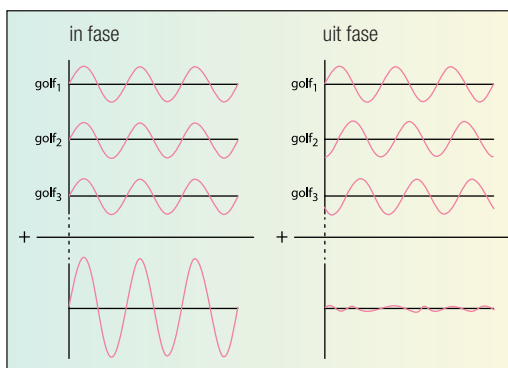
voorbeeld te kijken naar de golven op het water. We kunnen ons ook voorstellen dat twee golven elkaar kunnen versterken als ze gelijktijdig op eenzelfde plaats aankomen (in fase), maar elkaar ook kunnen opheffen als het maximum van de ene golf samenvalt met het minimum van de andere golf (uit fase).

Dit verschijnsel van versterken of opheffen noemt men interferentie. Interferentie is ook gekend bij andere soorten golven zoals geluid, licht, radiogolven, microgolven enz. . . Als men bijvoorbeeld een scherm met twee spleten belicht, zullen de golven die door beide spleten gaan elkaar achter het scherm op bepaalde plaatsen versterken, en op andere plaatsen opheffen. Zulke banden van afwisselende intensiteit

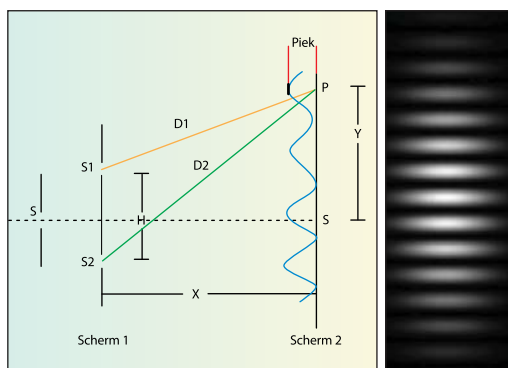
noemt men interferentiefranjes. Met een dergelijk experiment toonde Thomas Young in 1802 aan dat licht een golfkarakter heeft.

Men ziet interferentie bijvoorbeeld ook veroorzaakt door oliekringen op water, in parelmoer, in vlinder-vleugels, in opaal enzovoort. Zelfs gsm-antennes gebruiken interferentie van radiogolven om een gebruiker te lokaliseren.

Alleszins, alleen al het bestaan van interferentiefranjes vormde afdoende bewijs voor het golfkarakter van licht. James Maxwell deed daar later nog een schepje bovenop: hij bewees dat licht een elektromagnetische golf is, bestaande uit een elektrische



Het effect van de combinatie van golven kan je gemakkelijk afleiden uit de figuur. Komen twee golven samen, dan tel je de amplitude op. Golven die netjes synchroon lopen, gaan mekaar versterken. Golven die niet synchroon lopen, zwakken mekaar af.



Wanneer stralen D1 en D2 elkaar versterken, krijgen we een verlichte franje. Dit gebeurt wanneer hun lengteverschil overeenkomt met een geheel aantal golflengten:

$$D2 - D1 = n\lambda$$

Zijn ze uit fase, dan neemt de intensiteit snel af, en bij een volledige opheffing van de twee golven krijgen we een zwarte zone. Met een beetje driehoeksmmeetkunde kan je al snel de juiste positie van de franjes afleiden.

en een magnetische component. De deeltjestheorie van Newton leek daarmee dood en begraven. Dit toont trouwens meteen aan dat in de natuurwetenschappen uiteindelijk niet van belang is wie iets zegt, maar wel of de uitspraken elke inhoudelijke toets kunnen doorstaan. Ook de grootste wetenschappers, zoals Newton, hebben in de loop van hun leven uitspraken gedaan die achteraf niet (helemaal) correct bleken te zijn. Dit doet natuurlijk geen afbreuk aan al het werk dat ze hebben verricht.

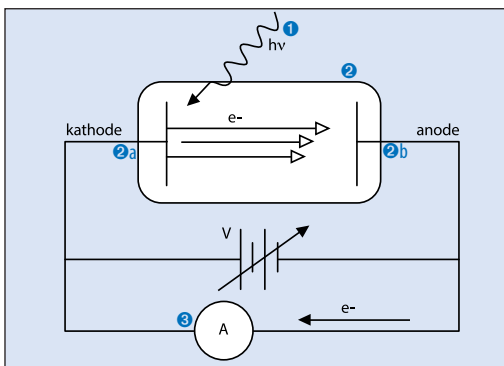
Het foto-elektrisch effect

Maar ook hier bleek er nog een donderwolkje aan de hemel te hangen, ditmaal onder de vorm van het foto-elektrisch effect. Dit is een fenomeen waarbij monochromatisch licht (dat wil zeggen, licht dat uit één enkele golflengte bestaat), dat invalt op een metalen plaat, in staat is om uit die plaat elektronen los te maken (zie de opstelling op de bijgevoegde figuur). Philipp Lenard, een van de onderzoekers die zich zeer grondig over het fenomeen boog, kwam alleszins voor de verrassing van zijn leven te staan. Immers, als licht een golfverschijnsel is, dan verwachten we het volgende:

- hoe intenser het licht, hoe meer energie de elektronen krijgen wanneer deze van de plaat worden losgemaakt
- bij zwak licht kan het een tijd duren voor er voldoende energie bijeengebracht is om de elektronen los te maken
- elke mogelijke kleur licht kan elektronen losmaken, als de belichtingstijd maar lang genoeg duurt.

De praktijk sprak die theorie echter tegen:

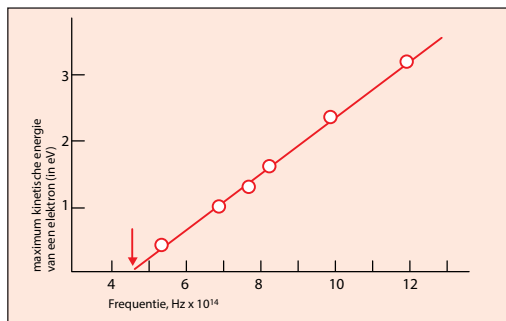
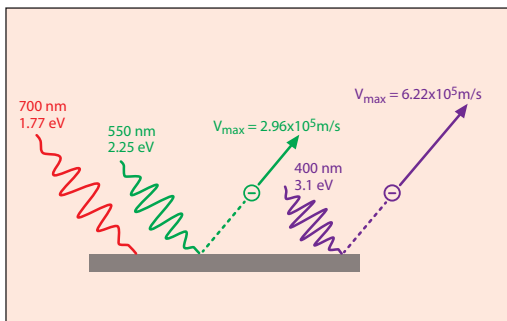
- De energie van de elektronen hangt niet af van de intensiteit van het licht, wel van de kleur. Er bestaat voor elke kleur een minimale spanning, waarbij er geen enkel elektron meer aankwam op de anode, maar ook die hangt niet af van de intensiteit van het licht. Deze laatste wordt enkel bepaald door het aantal elektronen dat loskomt.
- De elektronen komen onmiddellijk los, ongeacht de intensiteit van het licht, al zal een zwakkere lichtstraal slechts enkele elektronen losmaken
- Wanneer de golflengte van het licht te groot wordt (en daardoor boven een kritische waarde uitsteekt), komen er geen elektronen meer vrij.



Het toestel waarmee Lenard het foto-elektrisch effect onderzocht, bestaat uit een lichtbron (1), een vacuüm buis uit glas waarin zich twee metalen platen bevinden (2), en een ampèremeter (3). Die lichtstraal valt in op een van de twee metalen platen (2a), die verbonden is met de negatieve pool van een stroombron, en waaruit de elektronen worden losgemaakt. Deze plaat duiden we aan als kathode. Aan het andere eind van de buis bevindt zich de anode (2b). De stroom tussen anode en kathode wordt gemeten met een galvanometer en is een maat voor het aantal elektronen dat losgemaakt wordt door het licht. Door de lading op de anode negatiever te maken, kunnen bovendien de elektronen met te weinig kinetische energie worden teruggebogen. Zo krijgen we ook een beeld van de snelheid van de elektronen.



Onderzoek zelf het foto-elektrisch effect, met behulp van deze applet: tinyurl.com/foto-elektrisch-effect
tinyurl.com/foto-elektrisch-effect2



Het foto-elektrisch effect geeft een lineair verband tussen de kleur (frequentie) van het licht en de productie van elektronen

Einstein kwam in 1905 – zijn wonderjaar, zie kader – echter met een verklaring op de proppen, door de quanta van Planck opnieuw van stal te halen. Wanneer licht bestaat uit pakketjes (met als energie-inhoud $E = h\nu$), stelde hij, dan kunnen we ervan uitgaan dat één pakketje telkens verantwoordelijk is voor het losmaken van één elektron. Dit kost een hoeveelheid energie, W . Die waarde is afhankelijk van het metaal dat in de proef gebruikt wordt. Sommige metalen staan immers gemakkelijker hun elektronen af dan andere. Dit verklaart alvast waarom licht met een te grote golflengte (te kleine frequentie) nooit enig elektron zal vrijstellen uit de kathode: die lichtpakketjes bevatten nu eenmaal te weinig energie om aan die energiekosten W te voldoen.

De energie die uit dat pakketje overblijft, is de kinetische energie van het elektron. Ook die kunnen we bepalen. Immers, wanneer we de spanning tussen kathode en anode veranderen zodat de stroom doorheen het toestel net nul wordt (we noemen die spanning V_{stop}), dan hebben alle elektronen op dat

moment maximaal $e \cdot V_{\text{stop}}$ als energie (waarbij e staat voor de lading van een elektron). We kunnen dit opschrijven als vergelijking:

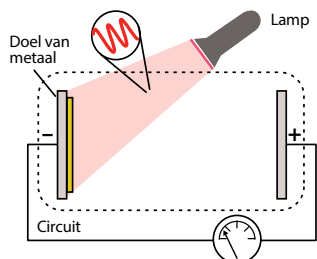
$$e \cdot V_{\text{stop}} = h\nu - W$$

Na een beetje algebra blijkt dan dat het verband tussen de frequentie van het invallende licht en de spanning V_{stop} een rechte is, met als richtingscoëfficiënt de verhouding h/e , dus tussen de constante van Planck en de lading van een elektron:

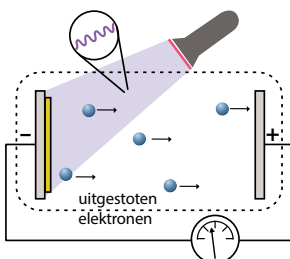
$$V_{\text{stop}} = (h/e) \cdot \nu - W/e$$

is immers een rechte van de vorm $y = mx + b$, waarbij m overeenkomt met h/e (en die richtingscoëfficiënt is dus ook een constante). Het snijpunt van deze rechte met de X-as ligt dan overigens bij $-W/h$ (reken dat zelf maar eens na).

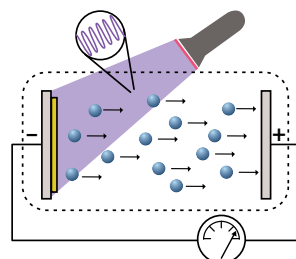
Als Einsteins theorie klopt, moeten we experimentele gegevens kunnen bekomen die dit laatste zo nauwkeurig mogelijk bevestigen. Dat is immers de beste toetssteen van goede wetenschap: zolang er geen



Bij een te lage frequentie van het licht komen er geen elektronen los en zien we geen stroom.



Bij instralen van licht met een voldoende hoge frequentie en met een lage intensiteit komen er maar enkele elektronen vrij. We meten een lage stroom.



Gebruik van hetzelfde licht als in (B), maar met hoge intensiteit zorgt voor een heleboel elektronen die vrijkomen en dus voor een hoge stroomsterkte.

goede metingen de theoretische voorspellingen ondersteunen, is de theorie waardeloos. In het geval van het foto-elektrisch effect zijn die er ook effectief gekomen: de grafiek bovenaan de vorige pagina toont het net besproken lineaire verband, aan de hand van metingen van Millikan uit 1916.

Het is overigens pas na het bekomen van dit experimenteel bewijs dat de wereld van de fysica echt

bereid was om het kwantumbegrip te aanvaarden. Het foto-elektrisch effect (en de verklaring van Einstein hiervoor) betekende dus finaal de grote doorbraak van de discrete energieniveaus van Planck.



Einstein en zijn Wonderjaar: 1905.			
In één jaar tijd verandert Einstein het aanzijn van de fysica meer dan eender wie ooit gedaan heeft. Hij doet dat aan de hand van vier fundamentele publicaties.			
Titel	Thema	Datum	Betekenis
On a Heuristic Viewpoint Concerning the Production and Transformation of Light	Foto-elektrisch effect	9 juni	Einstein legt het foto-elektrisch effect uit met behulp van het begrip kwantum.
On the Motion of Small Particles Suspended in a Stationary Liquid, as Required by the Molecular Kinetic Theory of Heat	Brownse beweging	18 juli	Einstein geeft aan hoe Brownse beweging een gevolg is van het bestaan van atomen.
On the Electrodynamics of Moving Bodies	Speciale relativiteitstheorie	26 september	Einstein verenigt de vergelijkingen van Maxwell met die van Newton. Hij verklaart zo het vreemde resultaat van Michelson en Morley.
Does the Inertia of a Body Depend Upon Its Energy Content?	Gelijkwaardigheid van massa en energie	21 november	$E = mc^2$: de formule die aan de basis ligt van wat we weten over radioactiviteit en kernfysica.

De elektronvolt als maat voor energie... en massa!

Wanneer we een deeltje met een lading q laten bewegen in een elektrisch veld met potentiaal V , dan krijgt (of verliest) dat deeltje een bepaalde energie die daarmee evenredig is: $E = qV$. Passen we dit nu toe op een elektron, dan definiëren we de elektronvolt als de hoeveelheid energie die een partikel met de lading van één elektron (e) verliest of wint wanneer dit partikel een potentiaalverschil van 1 volt (= 1 joule per coulomb, 1J/C) overbrugt.

De juiste waarde van 1 elektronvolt (eV) in joule is dan het product van

$$1 \text{ eV} = 1,602(17656535) \times 10^{-19} \text{ C} \times 1 \text{ J/C} = 1,602(17656535) \times 10^{-19} \text{ J}.$$

Op atomaire schaal is het alleszins eenvoudiger om energie uit te drukken in elektronvolt of in MeV (1 MeV = 10^6 eV of $1,602 \cdot 10^{-13}$ J) dan in joule.

Een elektronvolt komt door de vergelijking van Einstein ($E = mc^2$) echter ook overeen met een zeer kleine massa : 1 eV = $1,783 \times 10^{-36}$ kg, of 1 kg = $5,610 \times 10^{35}$ eV.

U bent zelf een golfpakketje!

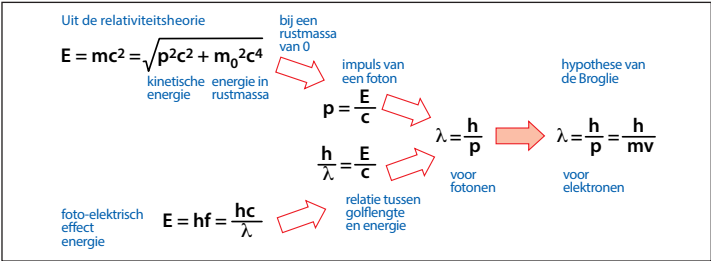
Sinds het begin van de twintigste eeuw werd dus het golfkarakter van het licht opnieuw in vraag gesteld, door Einstein en zijn experimenten over het foto-elektrisch effect. Meer nog – er zijn verrassend genoeg eigenschappen van licht die enkel kunnen verklaard worden door aan te nemen dat licht een golf is, en andere die vereisen dat licht bestaat uit deeltjes.

Fenomeen	Uit te leggen met golven	Uit te leggen met deeltjes
reflectie	JA	JA
breking	JA	JA
interferentie	JA	NEE
diffractie	JA	NEE
foto-elektrisch effect	NEE	JA

Stilaan groeide bij de fysici het besef dat beide hypothesen afzonderlijk verworpen dienen te worden: licht bestaat uit entiteiten die noch deeltje, noch golf zijn, maar die onder bepaalde omstandigheden deeltjeseigenschappen kunnen vertonen en onder andere omstandigheden golfeigenschappen. Deze golf-deeltjesdualiteit is een van de beginselen van de kwantummechanica.

Geldt dit dan alleen voor licht? Hoe zit het met elektronen? Volgens Louis de Broglie gold die dualiteit ook voor elektronen – en eigenlijk voor eender welk object met massa. Wel geldt dat hoe zwaarder het deeltje is, hoe kleiner de golflengte en hoe sneller de trilling van de golf. Terzijde - de Broglie formuleerde zijn hypothese in zijn doctoraal proefschrift. Zijn examenjury wist echter in eerste instantie niet wat te doen met deze zeer vooruitstrevende en gewaagde stelling, en stuurde een exemplaar naar Einstein. Die bestudeerde het werk van de Broglie uitgebreid en liet de jury vervolgens weten: *"I believe it is a first feeble ray of light on this worst of our physics enigmas"*. De Broglie mocht zich kort daarna doctor in de wetenschappen noemen.

Deze hypothese kan worden gecontroleerd in een twee-spletenexperiment. Hierbij laten we een bundel elektronen invallen op een dubbele spleet. De elektronenstraal wordt in twee gesplitst en afgebogen ter hoogte van de dubbele spleet. Beide deelbundels worden vervolgens opgevangen op een fluorescerende film. Het eindresultaat? Net zoals bij het experiment van Young zien we een afwisseling van heldere en donkere banden. Dat zijn interferentiepatronen, waaruit we besluiten dat de elektronen zich niet als deeltjes gedragen. Echter, we kunnen de



De Broglie leidt uit Einsteins vergelijking $E = mc^2$ (de vergelijking die stelt dat massa en energie gelijkwaardige concepten zijn) af dat een golf zoals een foton een impuls (hoeveelheid van beweging, mv) heeft.

Zelf aan de slag!

Experiment: speel eens met een laserpointer en creëer zelf interferentiepatronen. Maar richt je pointer niet naar een vliegtuig – dat verblindt de piloten.

tinyurl.com/laserpointer1

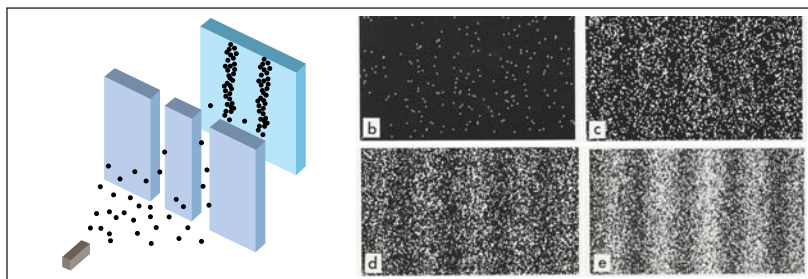
tinyurl.com/kwantumexperimenten

En wie veel tijd heeft, kan altijd deze lezing van Prof. Dr. Feynman herbeluisteren.

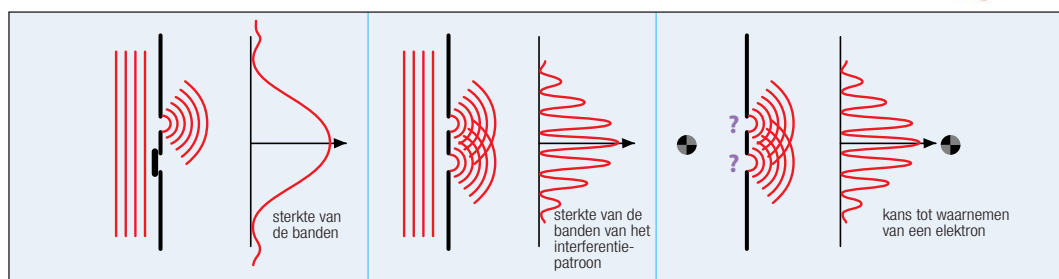
tinyurl.com/lezingfeynman

En misschien wil je wel wat steviger experimenten uitvoeren. Dat kan via het web op de Universiteit van München.

tinyurl.com/kwantumexperimenten2



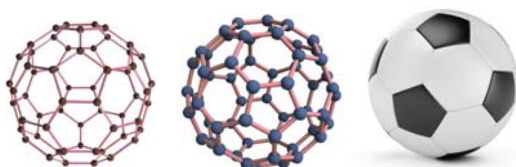
Dit is het beroemde experiment waarbij het interferentiepatroon van twee elektronenbundels wordt bepaald. Het experiment werd jarenlang louter als gedachte-experiment beschouwd, en het heeft om technische redenen tot 1989 geduurd voor de metingen ook effectief werden uitgevoerd. Voor wie het allemaal eens van dichterbij wil bekijken: tinyurl.com/interferentiepatroon



aankomst van de elektronen één per één detecteren – naargelang we meer elektronen zien we dat de individuele flitsen op het fluorescerende scherm geleidelijk het interferentiepatroon opbouwen. Hieruit kunnen we besluiten dat elektronen geen golven zijn, want dan zou het interferentiepatroon ineens in zijn geheel moeten verschijnen als de golf aankomt. Meer nog: als men een van beide spleten afdekt dan verdwijnt het interferentiepatroon. Dus moeten de elektronen tegelijk door beide spleten gaan – en dus op twee plaatsen tegelijk zijn. Draai dit hoe je wil, zo iets krijg je niet uitgelegd met de klassieke fysica van Newton.

Ook andere deeltjes zoals protonen en neutronen gedragen zich trouwens als golven. Meer nog – zelfs grote moleculen (met moleculaire massa's van 514 g/mol of 1298 g/mol) blijken zich te gedragen volgens de wetten van de kwantummechanica. En wat dacht je van experimenten met de C_{60} buckyball (zie figuur)? Het record tot nog toe staat trouwens op

naam van Sandra Eibenberger en haar collega's, die in de zomer van 2013 interferentiepatronen verkregen bij experimenten met gefluoreerde porfyries, bestaande uit 810 atomen met een totale massa van maar liefst 10 000 g/mol! En er is geen reden om aan te nemen dat het daarbij stopt. Ook macroscopische objecten zijn namelijk zowel golf als deeltje. Weliswaar neemt de golflengte omgekeerd evenredig af met de massa van een voorwerp. De Broglie had dus gelijk met zijn hypothese.



De buckyball is een molecule die bestaat uit 60 koolstofatomen. Meetkundig lijkt deze molecule perfect op een leren voetbal, waarbij de koolstofatomen op de hoekpunten van de leren lapjes van de voetbal zitten.

Over superpositie en ineenstortende katten

De golffunctie van Erwin Schrödinger

Als kwantumdeeltjes dan toch ook een golfkarakter hebben, dan moeten ze via een golfvergelijking kunnen beschreven worden. Die vergelijking werd in 1925 door de Oostenrijker Erwin Schrödinger naar voren geschoven, om daarmee de beweging van een golf/deeltje te kunnen berekenen. Deze vergelijking steunt op de theorie van de complexe getallen en is het best bekend als differentiaalvergelijking van de tweede orde. De onderliggende wiskunde laten we in dit dossier alleszins voor wat ze is, en we richten ons op de fysische betekenis.

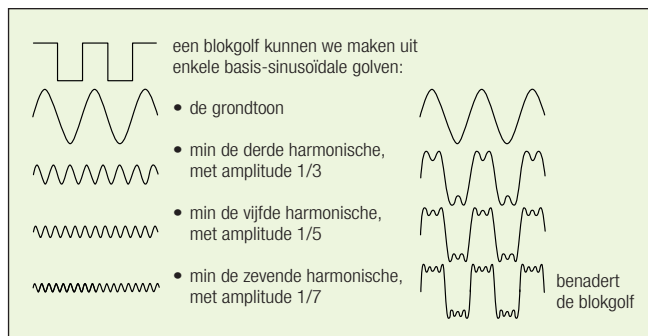
The diagram shows the Schrödinger equation:
$$\frac{\delta^2 \psi}{\delta x^2} + \frac{8\pi^2 m}{h^2} (E - V) \psi = 0$$
 Labels with arrows point to specific parts: 'Tweede afgeleide' points to $\frac{\delta^2 \psi}{\delta x^2}$; 'Golffunctie' points to ψ ; 'Positie' points to x in the denominator of the derivative; 'Energie' points to E ; and 'Potentiële energie' points to V .

Toch is het de moeite waard om de vergelijking eens van naderbij te bekijken. Om te beginnen is er de te berekenen golffunctie zelf. Wie voor een gegeven probleem de juiste uitdrukking vindt voor deze golffunctie, heeft de oplossing van het probleem gevonden. We duiden haar aan met de Griekse letter psi (ψ). Verder gaan we ervan uit dat die golf zich slechts in één richting (x) voortbeweegt: de vergelij-

king bevat enkel de tweede afgeleide van ψ in functie van x . Beweegt de golf zich in drie richtingen (x , y en z), dan zal de vergelijking de som van de tweede afgeleiden van ψ naar x , y en z apart bevatten. E en V zijn verder de symbolen voor respectievelijk de totale energie en de potentiële energie van de golf/het deeltje waar de vergelijking voor wordt opgelost.

Schrödinger realiseerde zich nog meer. Volgens de wiskundige theorieën van Joseph Fourier (1768-1830) bestaat namelijk elke functie, zoals dus ook onze golffunctie ψ , uit een combinatie van verschillende eenvoudige (periodieke) sinus- en cosinusfuncties.

Deze wiskundige rekentechniek krijgt van Schrödinger nu echter ook een fysische betekenis: we spreken over de **superpositie** van deze eenvoudige periodieke functies die leidt tot de meer ingewikkelde golffunctie ψ . Elke individuele periodieke component komt daarbij overeen met één mogelijke toestand van het hele systeem dat we bestuderen. Bovendien zijn de verschillende periodieke componenten harmonische veelvouden van elkaar: hun frequenties verhouden zich tot elkaar als gehele getallen. En die gehele veelvouden komen ons bekend voor: hier duiden opnieuw de quanta van Planck en Einstein op! Door de inspanningen van Schrödinger (en al wie na hem verder nadacht over het gebruik van golffuncties om het gedrag van kwantumdeeltjes te beschrijven) heeft de kwantummechanica ook de naam golfmechanica gekregen.



Erwin Schrödinger

acco

VAN BOEKEN GA JE DENKEN

NIEUW!

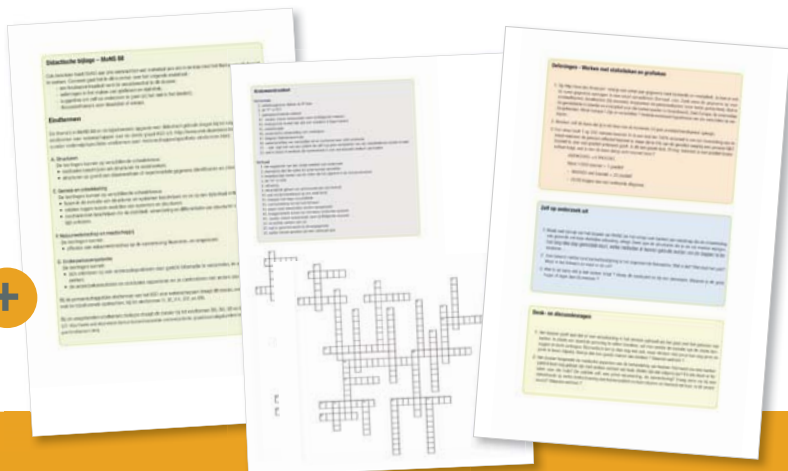
EEN EXTRA STUKJE **MENS**,

SPECIAAL VOOR GEBRUIK IN DE KLAS!

OVER KWANTUMMECHANICA VALT NATUURLIJK NOG VEEL MEER TE VERTELLEN. EN DAT DOEN WE DAN OOK.

Leerkrachten die geabonneerd zijn op MeNS kunnen op www.acco.be/mens89 nog een extra katern vinden, met bijkomend didactisch materiaal aansluitend op de vooropgestelde eindtermen voor wetenschappen:

- + Een kruiswoordraadsel
- + Suggesties om zelf op onderzoek te gaan
- + Discussiethema's voor klasdebat of essays



acco

VAN BOEKEN GA JE DENKEN

BOX VOORDEEL PRIJS 69,50 EUR

CHRISTOFFEL WAELEKENS, MANUEL SINTUBIN,
BERT DE GROEF EN PETER ROELS

VAN OERKNAL TOT MENS

EEN TRILOGIE OVER KOSMOS, AARDE EN LEVEN



Na 13,7 miljard jaar kosmische geschiedenis, 4,5 miljard jaar aardse geschiedenis en 3,8 miljard jaar geschiedenis van het leven op aarde, leggen sterrenkundigen, aardwetenschappers en biologen steeds meer puzzelstukken samen van dit wonderlijke verhaal. Het is het verhaal over hoe de bouwstenen voor aarde en leven in sterren worden aangemaakt, over hoe aarde en leven onlosmakelijk met elkaar verbonden zijn in de werking van deze levende planeet, over hoe de buitengewoon rijke biodiversiteit is kunnen tot stand komen. In deze trilogie wordt vanuit het standpunt van deze drie wetenschapsdisciplines de wereld om ons heen in beschouwing genomen. En telkens worden we geconfronteerd met dezelfde vragen als "wie zijn we?", "waar komen we vandaan?" en "wat brengt de toekomst?". Het antwoord dat de natuurwetenschappers op deze vragen kunnen geven, is tezelfdertijd zeer verrassend maar ook ontzettend ontluisterend.

ISBN 978 90 334 7754 6 // 2011 // 69,50 EUR

Deze luxe verzamelbox bestaat uit volgende 3 boeken



+



+



Bestel deze box via www.uitgeverijacco.be of mail uw bestelling, naam en adres naar bestelling@acco.be, met vermelding van de referentie "tijdschrift Mens" of kom naar één van onze boekhandels.

Acco Leuven
Maria-Theresiastraat 2-4
3000 Leuven
016/26 11 00

Acco Antwerpen
Prinsstraat 21
2000 Antwerpen
03/226 64 02

Acco Gent
Sint-Pietersnieuwstraat 105
9000 Gent
09/235 73 00

JOHAN DEHANDSCHUTTER

STERK STARTEN

SURVIVALKIT VOOR DE NIEUWE LEERKRACHT

Wie in het onderwijs begint, krijgt het van bij de start hard te verduren. Het is geen werkterein waarop je langzaam mag groeien. Om zijn toekomstkansen in de nieuwe school veilig te stellen, moet de beginnende leerkracht zich in de veeleisende werkomgeving staande houden en van bij de start een goede indruk maken op de vele betrokkenen.

Gelukkig beschikt de startende leerkracht hiertoe over een aantal krachtige instrumenten. Dit boek biedt hem inzichten en strategieën om van die instrumenten efficiënte middelen te maken om zijn doel te bereiken. Ze zijn gericht op leerkrachten van het secundair onderwijs en komen van een collega met meer dan 30 jaar ervaring als leerkracht. De schrijver is mentor-coach van zijn school sinds 2005.

Extra verhalen, tips en tricks vindt u op www.sterkstarten.be.

ISBN 978 90 334 9189 4 // 2013 // 96 blz. // 19,50 EUR



In het extra, gratis dossier vind je een aantal stellingen van startende leerkrachten. Ze behandelen de omgang met moeilijke klasgroepen en leerlingen, een fenomeen dat niemand koud laat, zeker niet de beginnende leraar. Bij elke stelling vind je een aantal inzichten en tips die je van dienst kunnen zijn. Het dossier kan je downloaden op www.acco.be/dossier-sterk-starten.



“Edere ervaren leerkracht, directie, inspectie, lerarenopleider zal dit boek zien als een waardevolle bijdrage, het opvullen van een leemte en een aanrader voor beginnende leerkrachten.”

- Joep Gorinsek, docent HUBrussel -

Bestel dit boek via www.uitgeverijacco.be of mail uw bestelling, naam en adres naar bestelling@acco.be, met vermelding van de referentie “tijdschrift Mens” of kom naar één van onze boekhandels.

Acco Leuven
Maria-Theresiastraat 2-4
3000 Leuven
016/26 11 00

Acco Antwerpen
Prinsstraat 21
2000 Antwerpen
03/226 64 02

Acco Gent
Sint-Pietersnieuwstraat 105
9000 Gent
09/235 73 00

DE JONGE BAEKELAND

2014

Prijzenpot van
2500 euro
geschonken door de
Nationale Loterij

Biomimicry

De natuur als laboratorium voor duurzame innovaties



*De neus van een hogesnelheidstrein geïnspireerd op de bek van een ijsvogel;
Leonardo Da Vinci's vliegtuig, gebaseerd op de vleugels van een vogel;
Robots die zonder botsen hun weg vinden, dankzij het sonarsysteem van vleermuizen;
De voetzool van een gekko als inspiratie voor nieuwe lijmen;
Optimalisatie van internetserveren dankzij het communicatiesysteem van bijen.*

Het zijn maar enkele voorbeelden van hoe de mens de natuur nabootst wanneer hij ontwerpt, schetst, uitvindt en ontwikkelt.

Ga op exploratie in de natuur en ga op zoek naar technologische en duurzame mechanismen van organismen die ons inspiratie geven, ons leven kunnen vergemakkelijken, verbeteren en perfectioneren. Wat is er zo bijzonder aan dat organisme, welke toepassingen zien we ten gunste van de mens en hoe kunnen we het ontwerp, mechanisme of overlevingsstrategie nabootsen? Laat jullie creatieve geest los en verbaas ons! Stoot je samen met je klasgenoten door naar de finale, dan debattee je mee met de professionals!



Bio-MENS vzw zoekt voor de 6de editie van De Jonge Baekeland creatieve durvers uit **derde graad secundair onderwijs**. Jongeren uit het ASO, TSO, BSO en KSO zijn welkom. Let wel op dat het wetenschappelijk verantwoord blijft. **Schrijf in als klasgroep t.e.m. 16 februari 2014.** Deelname is gratis.



www.biomens.eu facebook.com/jongebaekeland jongebaekeland.tumblr.com

Golven en waarschijnlijkheid

Wat betekent dit alles nu? Hoe moeten we die vreemde golffuncties interpreteren? Wat leren ze ons nu echt over de fysische werkelijkheid op sub-atomaire schaal? Dit is een vraag waar de fysica tot op vandaag nog niet helemaal uit is. Schrödinger zelf dacht dat elke golf zich in de hele ruimte zou uitstrekken. Dit bleek echter niet overeen te stemmen met heel wat experimentele waarnemingen, zoals het foto-elektrisch effect.

De meest gevolgde interpretatie is die van de Duitser Werner Heisenberg en de Deen Niels Bohr (en wordt omwille van de plaats waar deze laatste werkte wel eens de Kopenhageninterpretatie genoemd). Zijn visie over de betekenis van de golffunctie vertrekt van een fysisch kenmerk van golven, namelijk dat de amplitude in het kwadraat evenredig is met de intensiteit van de golfbeweging (zie ook MeNS 86, gehoor). In de kwantummechanica beschouwen we het kwadraat van de amplitude van de golffunctie op een bepaalde plaats, gelijk aan de kans dat het golf/deeltje zich op die bepaalde plaats bevindt. Dit zien we ook al opduiken in de figuur midden op pagina 11.

In tegenstelling tot de klassieke mechanica, waarbij we op een deterministische (dus rechtstreeks berekenbare en exacte) manier de positie en de bewegingen van een deeltje kunnen bepalen, gaat het in de kwantummechanica slechts over de waarschijnlijkheid dat een deeltje zich op een bepaalde plaats bevindt. De vergelijking van Schrödinger beschrijft perfect deterministisch hoe die kansen verdeeld zijn over de ruimte waar dat deeltje in te vinden is, maar

wanneer je een experiment doet om te zien waar het deeltje is, doe je een trekking uit die kansverdeling (dit noemen we stochastisch). Deze stap, de meting, is in de Kopenhageninterpretatie NIET deterministisch.

Meer nog – elke periodieke component van de golffunctie geeft telkens één mogelijke toestand van het deeltje weer. De gehele golffunctie, samengesteld uit al die componenten, is de superpositie van al die individuele mogelijkheden. Moeilijk? Ja. Maar laten we het twee-spletenexperiment nog eens anders bekijken. Zolang beide spleten open zijn, zijn ook beide trajecten (door de bovenste en door de onderste spleet) mogelijk. Elk van die trajecten komt overeen met één component van de algemene golffunctie. Deze twee componenten van de golffunctie kunnen interfereren. Wanneer we met zekerheid te weten komen welk traject ons golf/deeltje effectief aflegt, telt nog slechts één component mee zodat er geen interferentie kan optreden. Fysici zeggen dan dat de hele set gesuperponeerde golven ineens stort tot één enkele mogelijkheid (in het Engels: collapse).

De oorzaak van dit ineensstorten blijkt trouwens de meting zelf te zijn: door een van beide spleten te sluiten, weten we meteen waar de elektronen zich bevinden. Opnieuw schudt de kwantummechanica hier aan onze dagdagelijkse manier van denken: het uitvoeren van de meting, dus het verzamelen van informatie over een fenomeen, verstoort het fenomeen zelf! Of nog: door naar het systeem te kijken, veranderen we het vanzelf. Of, met een boutade: *durft er nu nog iemand beweren dat vallende bomen ook geluid maken als er niemand ze kan horen?*



Max Born





Conceptuele voorstelling van de kat van Schrödinger



Helgoland

Gesuperponeerde katten

De Kopenhageninterpretatie, waarin de fysica plots vol met waarschijnlijkheden zat, was niet makkelijk te verteren. Einstein had een dermate grote afkeer van het concept, dat hij zou hebben uitgeroepen: "Gott würfelt nicht!", oftewel, God speelt niet met dobbelstenen. Bohrs antwoord aan Einstein was overigens bijzonder laconiek: "Stop met God te zeggen wat hij moet doen!" Echter, Einstein stond niet alleen met deze gedachte. Ook Schrödinger zelf kon zich niet achter de Kopenhaagse gedachtengang zetten. Hij maakte dat duidelijk in 1935 aan de hand van wellicht een van de beroemdste gedachte-experimenten aller tijden: het verhaal over zijn kat.

Stel je voor, zegt Schrödinger, dat ik een kat opsluit in een doos, samen met een mechanisme dat bestaat uit een radioactief atoom, een geigerteller, een hamer en een flesje vergif. Die zijn op zulke wijze met elkaar verbonden, dat zodra het radioactief atoom vervalt en zijn radioactieve straling uitzendt (en de geigerteller die oppikt), er een signaal naar de hamer gaat, en deze het flesje vergif openbreekt. Wanneer het vergif zich in de doos verspreidt, sterft de kat ogenblikkelijk. Omdat het radioactief verval van een atoom een louter stochastisch proces is (we kunnen het exacte moment niet voorspellen), weten we niet wat er zich in de doos heeft afgespeeld. Op dat moment bestaat de kat in twee gesuperponeerde toestanden: dood en levend, naargelang het radioactieve verval heeft plaatsgehad of nog niet. Ook het

atoom zelf bestaat trouwens in twee gesuperponeerde toestanden. Pas wanneer we de doos openmaken om te kijken hoe het met de kat gesteld is - met andere woorden, pas wanneer we een meting doen - zien we in welke van beide toestanden de kat zich bevindt: dood OF levend. De golf functie stort dus ineen.

Schrödinger zelf had dit gedachtenexperiment eigenlijk geformuleerd om de absurditeit van de Kopenhageninterpretatie aan te tonen: hoe kan een kat nu dood EN levend tegelijkertijd zijn? Het antwoord op die paradox ligt in het feit dat de kat een macroscopisch wezen is. Om vanuit de microscopische schaal van het elektron over te gaan naar de macroscopische wereld zijn er massaal veel microscopische tussenschakels nodig. Elke tussenschakel heeft een golfkarakter. Maar door het optellen van een zulk groot aantal golven wordt het golfkarakter praktisch niet meer waarneembaar. In principe bestaan dus alle objecten van onze dagelijkse wereld uit een zeer groot aantal kleine deeltjes zoals elektronen, protonen enz. . . , die alle als golven bijdragen tot het geheel. Maar hun aantal is zo groot dat daardoor het golfkarakter verdwijnt. Het verschil tussen onze reële wereld en de microscopische wereld van de kwantummechanica is dus vooral een kwestie van schaal. Bovendien zit de onzekerheid over het lot van de kat niet bij het onfortuinlijke dier zelf, maar eerder bij de waarnemer. De lezer kan nu zelf bedenken, wat er zou gebeuren als de waarnemer mee in de doos zou zitten. . .



Werner Heisenberg



Impuls $p = \text{massa } m \times \text{snelheid } v \text{ van het voorwerp}$

En hoe zit het nu met de kat zelf? Die doet sinds haar eerste avontuur, in de gedachten van Schrödinger, vooral dienst als didactisch model, om superpositie tastbaar te maken.

Navigeren door de kwantumwereld: waar ben ik?

Stel de vraag “Waar ben ik?” aan een fysicus, en je krijgt als antwoord: “Geen idee, maar ik weet wel dat je te snel rijdt.” Oké, dat is een wetenschappelijk grapje – dat wil zeggen, een grapje met een wetenschappelijk principe als basis: het onzekerheidsprincipe van Heisenberg. Dat zegt immers dat je nooit tegelijkertijd volledige zekerheid kunt hebben over de plaats en de impuls (massa \times snelheid!) van een voorwerp.

Waar hooikoorts al niet goed voor is

Om dit goed te kunnen plaatsen, pikken we de draad van de geschiedenis op in de Roaring Twenties, meer bepaald in 1922, op een congres in de Alpen. De beroemde Niels Bohr, die dat jaar ook zijn Nobelprijs toegekend kreeg, sprak daar over zijn atoommodel, waarin elektronen als planeetjes rond de atoomkern cirkelden. Alleen – waarom en hoe elektronen in hun baan blijven en af en toe van baan naar baan sprongen, kon Bohr niet verder uitleggen. De vragen van een jonge assistent in het publiek, Werner Heisenberg, bleven grotendeels onbeantwoord, ook na een wandeling die de twee maakten in de wijde omge-

ving. Heisenberg zelf getuigde later over die wandeling wel dat dat het moment geweest was waarop hij zijn wetenschappelijke carrière (en een levenslange vriendschap met Bohr) echt voelde beginnen. Maar zijn problemen met het model van Bohr raakte hij niet kwijt.

De jongeman verhuisde in 1925 naar Göttingen, in Duitsland, op uitnodiging van Max Born. Hij pakte er het probleem van de atoombanen aan op een originele manier: in plaats van uit te gaan van concepten (zoals elektronenbanen) die niet konden gemeten worden, probeerde hij de toestand van de elektronen in een atoom enkel voor te stellen met meetbare waarden, zoals de frequenties van de lichtdeeltjes die worden uitgezonden wanneer elektronen van baan wisselen. Hij bracht al deze waarden netjes onder in tabellen en deed hetzelfde voor een pak andere variabelen: posities van elektronen, impuls van elektronen, ... Daarna begon hij ermee te rekenen, om te zien of hij ergens structuur kon vinden in de gegevens.

De grote doorbraak kwam er op 7 juni 1925. Als hooikoortslidder vond Heisenberg de lente en de zomer in Duitsland ondraaglijk, en was hij gevlucht naar Helgoland, een Deens eiland in de Noordzee, waar hij gemakkelijker kon ademen... en doorwerken. Die nacht ontdekte hij echter, tot zijn grote verbazing, het volgende: als hij tabel A met de waarden van de posities van de elektronen vermenigvuldigde met tabel B met de waarden voor hun impuls, dan

bekwam hij niet hetzelfde resultaat als wanneer hij tabel B vermenigvuldigde met tabel A. In symbolen uitgedrukt:

$$A \times B \neq B \times A$$

Meer nog, het verschil tussen beide tabellen kwam steeds neer op $h/4\pi$! Bovendien voelde hij aan dat dit inzicht hem in staat zou stellen om zijn problemen met het atoommodel van Bohr op te lossen. Wat een wetenschapper voelt wanneer hij een dergelijk inzicht bereikt? We laten Heisenberg zelf aan het woord: *"It was about three o' clock at night when the final result of the calculation lay before me. At first I was deeply shaken. I was so excited that I could not think of sleep. So I left the house and awaited the sunrise on the top of a rock."*

Bij zijn terugkeer in Göttingen legde Heisenberg zijn bevindingen voor aan Born. Die herkende dit soort problemen: dit had te maken met de wiskunde van matrices (een wiskundige manier om met tabellen om te gaan), waarbij inderdaad de commutativiteit niet geldt voor de vermenigvuldiging. Born haalde er zijn assistent Pascual Jordan bij. Met z'n drieën legden ze de basis voor wat later de matrixmechanica is gaan heten.

Nog anders geformuleerd komt deze ontdekking neer op het volgende: wanneer we van een kwantumdeeltje de exacte positie x willen kennen, of de exacte impuls p , dan zal er telkens een mate van onzekerheid overblijven (in symbolen: Δx en Δp). Uit de ontdekking van Heisenberg weten we nu dat

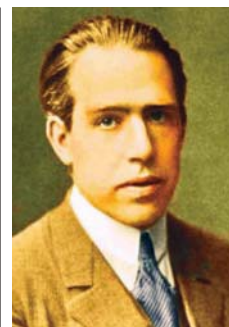
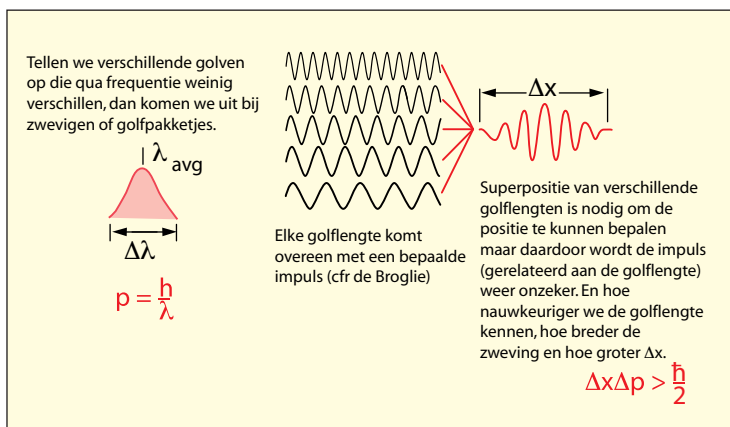
$$\Delta x \cdot \Delta p \geq h/4\pi$$

oftewel, hoe zekerder je bent van de eerste waarde, des te minder zeker je kan zijn van de andere. De waarde $h/4\pi$ dient hierbij als ondergrens.

Vermits de hoeveelheid van beweging of de impuls p evenredig is met de snelheid, kunnen we stellen dat de nauwkeurigheid van de plaatsbepaling van een bewegend deeltje, beperkt wordt door de nauwkeurigheid van de snelheidsbepaling van dat deeltje. Of nog: hoe meer we weten over de snelheid van een deeltje, hoe slechter we wegen waar dit deeltje zich bevindt. En dan zijn we weer bij ons grapje van een bladzijde terug.

Het golfpakketje: Heisenberg en de Broglie slaan de handen ineen

Heisenbergs resultaat komt ons des te vreemder voor omdat we de wereld natuurlijk zien als samengesteld uit objecten met een specifieke plaats. Wanneer we echter de bril van de Broglie opzetten en de wereld beschouwen als een verzameling golven, dan valt er al wat meer op zijn plaats. Kijk maar op de figuur. Een golfpakketje spreidt zich immers uit over een bepaalde zone met grootte Δx . Bovendien vormt een dergelijk pakketje zich net uit de superpositie van verschillende golven met sterk gelijkaardige golflengte (en dus, impuls: Δp). Meer nog: hoe breder het gamma aan golflengten (hoe kleiner Δp), hoe groter het gebied waarover het golfpakketje zich uitspreidt (hoe groter Δx).



Niels Bohr



De gevolgen van het onzekerheidsprincipe van Heisenberg gaan echter verder. Om te beginnen vertrekt Heisenberg van de stelling dat enkel meetbare gegevens en grootheden echt een betekenis hebben in de fysica. Wat we niet kunnen meten (of uit meetwaarden berekenen) heeft dus geen betekenis. Maar de toekomstige baan van een partikel kunnen we niet (exact) meten en evenmin (exact) berekenen. Wat er overblijft, zijn een reeks mogelijke beschrijvingen van die baan (met elk een waarschijnlijkheid die we uit de vergelijking van Schrödinger kunnen afleiden). Of om Heisenberg een laatste keer zelf het woord te geven: "In the sharp formulation of the law of causality - "if we know the present exactly, we can calculate the future" – it is not the conclusion that is wrong but the premise." Niet de bewering dat we de toekomst kunnen berekenen is fout, wel dat we het heden perfect kunnen kennen.

Intermezzo - Plato en de kwantumwereld

Is dit nu nog wel wetenschap? Begrijpen we wat er gebeurt in de kwantumwereld? Of concluderen we beter dat de realiteit te complex is voor onze menselijke hersenen en stoppen we dan maar met verder onderzoek? Laten we even de wetenschap voor wat ze is, en laten we een klein uitstapje maken met een eerder filosofische inslag. Waarheen gaat de reis? Wel, naar een welbepaalde grot in het Oude Griekenland.

Stel je een grot voor, zegt de bekende filosoof Plato, zo diep onder de grond, dat er geen daglicht binnenvalt. Onderin zit een groep gevangenen, met hun rug naar de opening. Ze zijn zo geketend, dat ze enkel naar de rotswand voor hen kunnen staren. Achter hen brandt een vuur op een richel. Het enige wat deze mensen zien, zijn de schaduwen op de rotswand van de voorwerpen die voorbij dit vuur passeren. Plato stelt nu dat het enige waar deze gevangenen over kunnen spreken met elkaar, hun versie van de realiteit is: de versie die zij kunnen waarnemen.

En inderdaad. In onze dagelijkse wereld kunnen we alleen onze versie van de werkelijkheid waarnemen. Die is als het ware een projectie van de echte wereld op de wand van onze grot. We gaan ervan uit dat we die wereld begrijpen: we kennen de meeste spelregels van die wereld, we kennen de onderdelen van die wereld en we weten hoe we met die onderdelen moeten omgaan. Voor een groot deel doen we daarvoor een beroep op onze alledaagse ervaring. De klassieke fysica (met begrippen zoals kracht, versnelling, spanning, ...) stemt daarmee goed overeen.

Maar de werkelijkheid buiten onze grot kan zich afspelen in een wereld van een andere dimensie waarin abstracte begrippen voorkomen die we niet kennen in onze reële wereld, waarin we niet meer kunnen terugvallen op onze ervaring en die we dus niet kunnen uitleggen in gewone mensentaal. Ons

intuïtieve begrippen laat ons hier in de steek (en dat heeft de lezer van dit dossier ondertussen al... persoonlijk ervaren).

Er bestaat echter ook nog een andere vorm van begrijpen. Stel dat een persoon beweert dat hij een bepaald onderwerp volledig begrijpt. De enige manier om dat te controleren is om hem daarover zoveel mogelijk vragen te stellen. Indien hij dan op elke mogelijke denkbare vraag een correct antwoord geeft, dan moeten we wel besluiten dat hij het onderwerp begrijpt. Dit geldt ook voor wetenschappers, wanneer zij claimen om de werkelijkheid te begrijpen. De enige methode die zij hebben om de wereld te onderzoeken en te begrijpen, dus de enige vragen die zij aan de natuur kunnen stellen zijn experimenten. En de uitkomsten van onze experimenten zijn steeds reëel. Indien iemand een theorie formuleert die in staat is om elk denkbaar experiment te verklaren dan begrijpt hij wel degelijk de werkelijkheid. Zelfs al gebruikt hij daarvoor een wiskundig model dat concepten bevat die we niet kennen in onze dagelijkse wereld en die hij niet kan uitleggen in mensentaal.

Fysicus Paul Dirac stelde het zo: *“Zeur niet, reken uit.”*

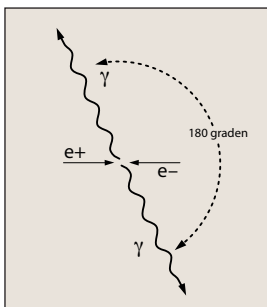
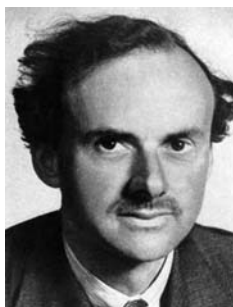
Over wiskunde en de werkelijkheid

Doorheen de ontwikkeling van de wetenschappen zien we trouwens dat wiskunde steeds belangrijker wordt om de nieuw ontdekte concepten en wetmatigheden te beschrijven. Zo moest bijvoorbeeld Kepler voor zijn broodheer in Praag horoscopen opstellen. En om dat te kunnen doen, moest hij de stand van de planeten kunnen voorspellen. Daarom observeerde hij gedurende jaren de banen van planeten om daaruit een soort empirische wetmatigheden af te leiden die hem toelieten de banen te extrapoleren naar de toekomst. Dat zijn de zogenoemde wetten van Kepler.

Maar dan komt er een genie zoals Newton, die in staat is om de empirische wetten van Kepler te reduceren tot drie abstractere uitdrukkingen: de wetten van Newton. Dat zijn dus geen wetten die dogmatisch moeten worden aanvaard maar de meest compacte manier van samenvatten van alle waarnemingen. Men noemt dat unificatie. Om de wetten in zulke compacte vorm te krijgen moest Newton trouwens een nieuw soort wiskunde invoeren: de taal van de afgeleiden en de integralen.

Eenzelfde situatie deed zich voor toen men elektriciteit en magnetisme ontdekte. Na bijna een eeuw van experimenteren door Ampère, Ohm, Oersted, Faraday, ... slaagde Maxwell er in 1873 in om alle waarnemingen samen te brengen in de vier compacte uitdrukkingen die we sindsdien de vergelijkingen van Maxwell noemen. Ook daarvoor had hij nieuwe wiskunde nodig, die van de differentiaaloperatoren. Op basis van die formules slaagde Maxwell erin het bestaan te voorspellen van elektromagnetische golven en die werden tien jaar later ook effectief als dusdanig herkend. En tot vandaag wordt nagenoeg alle elektronica (gsm, gps...) ontworpen op basis van de vergelijkingen van Maxwell. In 1905 en 1911 zette Einstein de nodige stappen om de mechanica (Newton) en het elektromagnetisme (Maxwell) verder te unificeren in de relativiteitstheorie. Ook daarvoor had hij nieuwe wiskunde nodig (tensorrekening).

Voor het beschrijven van de experimenten van de kwantummechanica had men naast de wiskunde van de complexe functies ook nog Hilbertruimten nodig – alweer een nieuwe tak van de wiskunde. En om de recente stappen in de verdere unificatie van de fysica te zetten, probeert men de nieuwe wiskunde van de snarentheorie. Samengevat kan men stellen dat wiskunde de taal is die het mogelijk maakt de waarnemingen van onze wereld zo compact mogelijk voor te stellen.

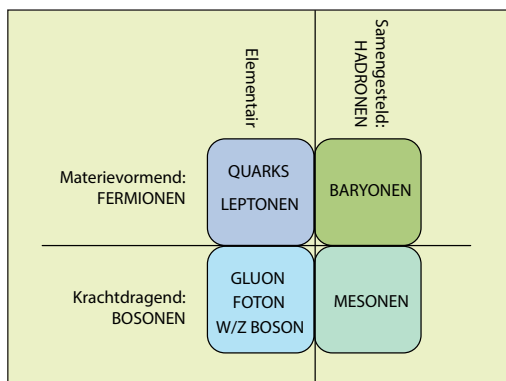


Over Dirac zei Einstein ooit: "This balancing on the dizzying path between genius and madness is awful." De man moet trekken van autisme hebben ten toon gespreid. Los daarvan was hij een van de grootste theoretische genieën van de twintigste eeuw. Op de vraag wat zijn fundamentele filosofie in het leven inhield, moet Dirac ooit geantwoord hebben: "Dat de natuurwetten in mooie vergelijkingen kunnen gevat worden."

Dat zette hij ook om in de praktijk: toen zijn eerste poging tot een relativistische kwantummechanica volgens hem een draak van een vergelijking opleverde, herschreef hij ze gewoon, als een combinatie van twee eenvoudiger vergelijkingen. De eerste beschreef het elektron, de tweede leverde het positron op.

Als een intelligent buitenaards wezen analoge experimenten zou doen en die eveneens zo compact mogelijk zou willen voorstellen dan is het denkbaar dat hij op eenzelfde wiskundige structuur beroep moet doen. Misschien is dit wezen intelligenter en heeft het nog compactere, betere vormen van wiskunde ter beschikking... Dan nog is dat vooral te danken aan de wetmatigheden die zich in de observaties voordoen. En in die zin is de wiskunde universeel. En dan is die wiskunde geen uitvinding van de mens maar een ontdekking. Wel is het mogelijk dat wiskundigen verder creatieve nieuwe wiskundige structuren bedenken. Dan zijn dat wel menselijke uitvindingen, maar die zijn dan niet noodzakelijk om beter de wereld te begrijpen. In ieder geval is wiskundige kennis immens belangrijk voor het begrijpen van de wereld.

En ook dat had Plato voorzien – boven de toegang tot diens Academie (een school waar wijsgerige en nieuwsgierige mensen van gedachten konden wisselen en elkaar kennis en inzichten bijbrachten) pronkte namelijk de spreuk **ἀγῶμétrητος μηδείς εἰσίτω**. Vrij vertaald komt die neer op: "Wie geen wiskunde kent, heeft hier niets te zoeken."



Je kan het ook als volgt bekijken, met dank aan een bekende Amerikaanse sitcom...
tinyurl.com/kwantumtbtt

De zee (en de zoo) van elementaire deeltjes

Dirac en het positron

Voor de laatste maal keren we terug in de tijd, om een laatste grote held van de kwantummechanica te leren kennen. Niet dat er later geen grote namen meer opduiken (integendeel), maar hun werk op zich is al voldoende voor een nieuw nummer rond dit thema. Zoals we op het einde van het stukje over Heisenberg al vermeldden, bestonden er tegen het einde van de jaren twintig van de vorige eeuw twee gelijkwaardige wiskundige beschrijvingen van de kwantummechanica: de golfvergelijking van Schrödinger en de matrixmechanica van Heisenberg, Born en Jourdan.

Ongeveer tegelijkertijd betreedt de Engelse fysicus Paul Dirac het toneel. In 1928 unificeert hij de relativiteitstheorie en de kwantummechanica, en stelt hij een vergelijking voor die de golf functie van het elektron op relativistische wijze beschrijft (die later zijn naam gaat dragen). In 1930 toont hij aan dat de benaderingen van Heisenberg en Schrödinger gelijkwaardig zijn. Ook later blijft Dirac verder werken aan de theoretische benadering van de kwantummechanica. Hij wordt daarbij een groot voorbeeld voor heel

wat theoretici van na de Tweede Wereldoorlog, zoals Richard Feynman.

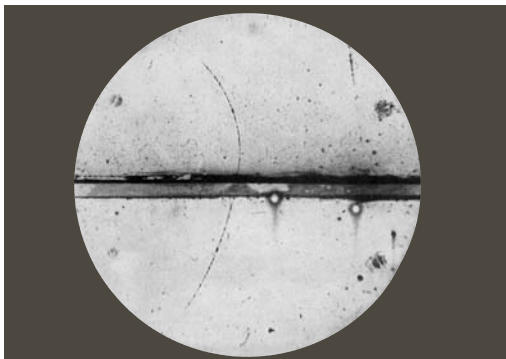
Een van de eerste voorspellingen van de Diracvergelijking was bijzonder intrigerend: het bestaan van een soort van anti-elektron, gelijk in massa, maar tegengesteld in lading. Wanneer een positron en een elektron botsen, vernietigen ze elkaar, en blijven er twee fotonen over, die in tegengestelde richting worden uitgestuurd. De energie van elk van beide fotonen is 511 keV (hetgeen er overblijft na conversie van alle massa van beide deeltjes volgens de vergelijking van Einstein, $E = mc^2$).

De bouwstenen van de materie

Daarmee opende Dirac een heel nieuw studiegebied: de fysica van de elementaire deeltjes. De basisbouwstenen van het atoom waren tegen het begin van de jaren dertig van de vorige eeuw reeds goed bekend (zie tabel). In 1932 levert Carl D. Anderson bovendien het nodige bewijs voor het bestaan van het positron. Daarmee was het verhaal niet afgelopen. In 1931

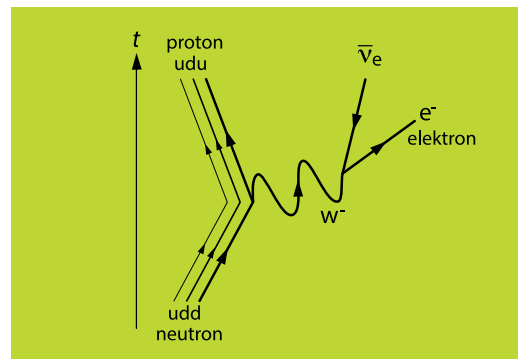
voorspelde Wolfgang Pauli het bestaan van het neutrino (wat werd bevestigd in 1956). In 1935 volgde het pion (door Hideki Yukawa) en in 1936 het muon (ook door Anderson). Vijftien jaar later was er een dermate grote variatie aan partikels gevonden, dat het tijd werd om er wat orde in te scheppen. Dit gebeurde in eerste instantie met behulp van het quark-model, en later door het standaardmodel van de materie.

massa →	≈2.3 MeV/c ²	≈1.275 GeV/c ²	≈173.07 GeV/c ²	0	≈126 GeV/c ²
lading →	2/3	2/3	2/3	0	0
spin →	1/2	1/2	1/2	1	0
	u up	c charm	t top	g gluon	H Higgs boson
	≈1.8 MeV/c ²	≈95 MeV/c ²	≈4.18 GeV/c ²	0	
	-1/3	-1/3	-1/3	0	
	1/2	1/2	1/2	1	
QUARKS	d down	s strange	b bottom	γ photon	
	0.511 MeV/c ²	105.7 GeV/c ²	1.777 GeV/c ²	91.2 GeV/c ²	
	-1	-1	-1	0	
	1/2	1/2	1/2	1/2	
	e electron	μ muon	τ tau	Z Z boson	
	<2.2 eV/c ²	<0.17 MeV/c ²	<15.5 MeV/c ²	0.4 GeV/c ²	
	0	0	0	±1	
	1/2	1/2	1/2	1	
LEPTONEN	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	W W boson	BOSONEN



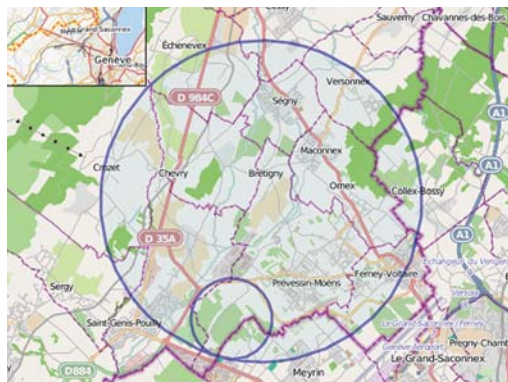
Antimaterie?

Inderdaad, positronen zijn een vorm van antimaterie. Voor elk van de 12 "gewone" fermionen bestaat er een antipartikel. Ook hogere organisatievormen zijn mogelijk: uit antiquarks maken we een antiproton (met lading $-e$), en in 1995 en 1996 werd er voor het eerst antiwaterstof gemaakt (bestaande uit een antiproton als kern en een anti-elektron daar rond). Opslag van deze deeltjes gebeurt in elektromagnetische velden: de botsing tussen materie en antimaterie leidt immers ook op deze hogere niveaus tot annihilatie (wederzijdse vernietiging), en heel wat plots vrijkomende energie. Hoeveel? Wel, laten we het zo stellen: met enkele tientallen milligrammen antimaterie zijn voldoende om een bemande missie naar Mars te sturen.



De bèta-straal

Atomen zijn radioactief wanneer hun kern op een of andere manier onstabiel is. Een te hoog aantal neutronen in vergelijking met het aantal protonen is een van de mogelijke oorzaken van die instabiliteit. Wanneer een dergelijk radioactief atoom vervalt en een bètastraal (eigenlijk een elektron) uitstuurt, verandert een neutron in een proton, doordat een down-quark (d) verandert in een up-quark (u). Hiervoor stuurt het neutron een W^- -boson weg. Dit splitst zich vervolgens op in een elektron en een antineutrino. In symbolen, voor de liefhebber: $d \rightarrow u + e^- + \bar{\nu}$



De locatie van de Large Hadron Collider, waar de opwindende experimenten rond elementaire deeltjes plaatsvinden. De LHC ligt op 50-175 m diep, en heeft een omtrek van 27 km.

Heden ten dage zijn er een 200-tal subatomaire deeltjes bekend. Binnen deze groep onderscheiden we om te beginnen de fermionen en bosonen. Fermionen zijn de deeltjes die de materie uitmaken (en hun antideeltjes, die de bouwstenen zijn voor antimaterie), bosonen zijn de deeltjes die de interacties tussen de fermionen uitvoeren. Tevens maken we een onderscheid tussen enerzijds de elementaire deeltjes en anderzijds de hadronen (de deeltjes die uit elementaire deeltjes worden opgebouwd). De hadronen vallen uiteen in baryonen (deeltjes die zijn opgebouwd uit drie quarks en ook behoren tot de fermionen) en mesonen (opgebouwd uit een quark en een antiquark, en behorende tot de bosonen).

Bij de elementaire fermionen onderscheiden we twee groepen van zes deeltjes: de quarks (up, down, color, strange, top en bottom genoemd) en de leptonen (waaronder het elektron, het muon en het neutrino). Quarks kunnen interageren via de sterke kernkrachten en vormen zo hadronen, terwijl leptonen dit nooit doen.

Krachten tussen deeltjes

De vier fundamentele krachten in de natuur zijn de zwaartekracht, de elektromagnetische krachten, de zwakke kernkracht en de sterke kernkracht.

Elektromagnetische krachten zijn krachten die spelen tussen geladen deeltjes. Hierbij ondervinden deeltjes in rust elektrostatische aantrekking, en gaan bewe-

gende ladingen daarenboven gepaard met magneetvelden. De zwakke en sterke kernkrachten zijn deze, die spelen op het niveau van de kerndeeltjes. De zwakke kernkrachten zijn daarbij verantwoordelijk voor het radioactief verval van de kern (vooral dan het produceren van γ -stralen), terwijl de sterke kernkrachten de kerndeeltjes bij elkaar houden. Deze laatste zijn daarbij veel sterker dan de elektromagnetische afstoting tussen de protonen in de atoomkern. De zwaartekracht, ten slotte, de aantrekkingskracht tussen twee massa's, is bij iedereen genoegzaam bekend. Nochtans is dit de zwakste van de vier.

Deze fundamentele krachten komen tot stand doordat de materiedeeltjes (fermionen) andere, krachtvoerende deeltjes (de zogenaamde ijkbosonen) uitwisselen met elkaar – zoals een team rugbyspelers de bal heen en weer gooit. Deze bosonen dragen daarbij quanta energie over van fermion naar fermion (en dat doen rugbyballen tot nader order nog niet). Elke kracht doet daarbij een beroep op een specifieke groep ijkbosonen. De elektromagnetische kracht wordt overgebracht door fotonen (die ook licht met zich meedragen). De zwakke aantrekkingskrachten in de kern worden gedragen door de W- en Z-bosonen. De sterke kernkrachten, tot slot, hangen af van de werking van de gluonen: deze lijmen (Eng. to glue) de quarks in de protonen en neutronen aan elkaar. Fysici vermoeden dat er nog een onbekend boson bestaat, dat dient om zwaartekracht over te dragen van partikel naar partikel. Omdat de zwaartekracht op subatomair niveau echter zoveel zwakker

is dan de andere drie krachten, is het bijzonder moeilijk om dit boson (het graviton?) waar te nemen.

Naast de ijkbosonen bestaan er ook de samengestelde bosonen, waar we hier niet verder op ingaan. Tot slot is er ook nog het Englert-Brout-Higgs-boson (afgekort: EBH-boson). Dit deeltje komt overal in het universum voor, en is gekoppeld aan een gelijknamig veld (te vergelijken met een elektrostatisch veld of een magneetveld). Het is ervoor verantwoordelijk dat de materie die zich in het veld bevindt effectief een massa heeft, en deze massa hangt af van de mate waarin die materie met dit veld interageert. Fotonen doen dit bijvoorbeeld in het geheel niet (en hebben dus ook geen massa); Z-bosonen, neutronen, elektronen, enz. ... interageren wel met het EBH-veld, en hebben dus wel een massa.

Die interactie kan je je nog het best voorstellen als volgt: neem aan dat het EBH-veld zich gedraagt als een laag siroop is die over het universum ligt. Elementaire deeltjes die zich doorheen het universum bewegen blijven meer of minder kleven aan die sirooplaag. En deze interactie tussen materie en EBH-veld vertraagt daardoor de materie.: de materie krijgt als het ware een zekere inertie... en laat inertie nu net de belangrijkste eigenschap zijn die al sinds Newton wordt gekoppeld aan het hebben van massa!

Over het algemeen neemt men aan dat deze vier krachten verschillende verschijningsvormen zijn van één centrale unificerende kracht, die tot op heden nog niet is ontdekt. Voor de elektromagnetische krachten

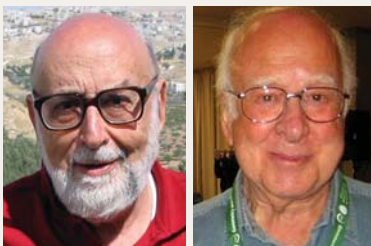
en de zwakke kernkrachten is inderdaad al aangetoond dat we die twee samen kunnen veralgemenen tot de elektrozwakke krachten. Consolidatie van deze laatste met de sterke kernkrachten heeft geleid tot het Standaardmodel van de Natuurkunde. Enkel de zwaartekracht ontsnapt nog aan deze zienswijze.

Is de zoo nu volledig?

Hoe weten we of ons model volledig is? Wel, hoe beter de theoretische voorspellingen terug te vinden zijn in de experimentele gegevens, hoe zekerder we kunnen zijn dat ons model volledig is en we alle onderdelen kennen. Denk aan de moeite die Planck zich getroost heeft om een theoretische benadering te vinden die wel overeenkwam met de opgemeten stralingscurves. Of denk aan de manier waarop de planeet Neptunus is ontdekt: onze modellen van het zonnestelsel waren niet volledig genoeg om enkele afwijkingen in de baan van Uranus te verklaren. Dit leidde tot een zoektocht naar een ontbrekend hemellichaam...

Zo zal het ook onze huidige kennis over elementaire deeltjes vergaan. Zolang onze experimentele resultaten blijven passen op de theorie, gaan we ervan uit dat we alle puzzelstukjes in handen hebben. Op het moment dat de experimenten beginnen afwijken, wordt de theorie bijgesteld. En dat dit nodig zal zijn, staat buiten kijf. Volgens de nieuwste bevindingen weten we over 95% van alle materie in het universum nog zo goed als niets. Er is dus nog bijzonder veel werk aan de winkel!

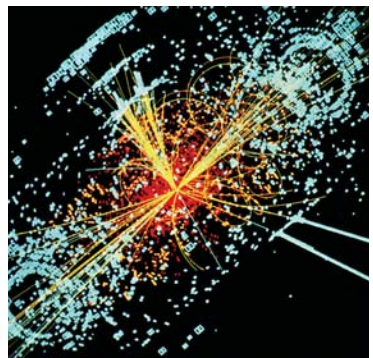
Boson betekent Nobelprijs voor Belg en Brit



François Englert (BE)

Peter Higgs (GB)

De Nobelprijswinnaars van 2013, voor hun theoretisch werk (uit de jaren 60) waarin ze reeds het bestaan van het EBH-boson voorspelden.





De groepsfoto van Vde Solvay

• achterste rij: A. Piccard, E. Henriot, P. Ehrenfest, E. Herzen, Th. de Donder, E. Schrödinger, J.E. Verschaffelt, W. Pauli, W. Heisenberg, R.H. Fowler, L. Brillouin;

• middelste rij: P. Debye, M. Knudsen, W.L. Bragg, H.A. Kramers, P.A.M. Dirac, A.H. Compton, L. de Broglie, M. Born, N. Bohr;

• voorste rij: I. Langmuir, M. Planck, M. Skłodowska-Curie, H.A. Lorentz, A. Einstein, P. Langevin, Ch.-E. Guye, C.T.R. Wilson, O.W. Richardson

Brussel, 1927: Daar gaan de zekerheden

Bij wijze van besluit kijken we best eens terug naar het lijstje met de zekerheden (pagina 2) waar fysici van uitgingen aan het einde van de negentiende eeuw.

De rechterkolom van de tabel geeft weer wat de kwantummechanica overliet van dit lijstje: niets. Dat was ook de conclusie van de beroemde Vijfde Solvay-Conferentie, gehouden op 24 oktober 1927 in Brussel. Bij de 29 deelnemers waren er maar liefst 17 Nobelprijswinnaars (hoewel nog niet allemaal toegekend ten tijde van deze bijeenkomst). Allemaal hebben ze op fundamentele wijze bijgedragen aan

Het universum is in feite één reusachtige machine.	Blijkbaar werkt het universum vooral met kansverdelingen en probabiliteiten (zie de Kopenhageninterpretatie van de Schrödingervergelijking). En Heisenberg laat het exact beschrijven van de huidige werkelijkheid niet toe.
Elke gebeurtenis heeft een oorzaak, en is daar het gevolg van.	
Het universum is daardoor een deterministische machine. Met andere woorden: alles is berekenbaar, niets is onzeker.	Licht, elektronen, protonen, moleculen, ... kunnen zich zowel als deeltjes en als golf gedragen. De tussentoe-stand is dus de enige juiste mogelijkheid. Op macros- copisch vlak mag men het golfaspect verwaarlozen.
De eigenschappen van licht kennen we uit de vergelijkingen van Maxwell. Licht is een fenomeen dat steunt op golven.	
Ofwel bestaat energie als deeltjes, ofwel als golven. Een tussentoesand is er niet.	
De eigenschappen van een systeem kunnen we met eender welke nauwkeurigheid bepalen.	Er is een absolute ondergrens aan nauwkeurigheid. Die is zo klein, dat we er op macroscopisch vlak geen last van hebben, maar op subatomair vlak speelt het onze- kerheidsprincipe van Heisenberg een belangrijke rol.

de moderne fysica en de moderne chemie. De oudste was Max Planck, met wie we het verhaal zijn begonnen; Dirac was de jongste aanwezige (en hij zou even na deze conferentie zijn grote bijdrage leveren). Met recht en reden kunnen we dus besluiten dat de kwantummechanica ons beeld van de wereld rondom ons behoorlijk diepgaand heeft veranderd. Onze intuïtie, die regelmatig goed werkt bij de fysica op onze menselijke schaal, blijkt de bal volledig mis te slaan op de kwantumschaal. Dit wil niet zeggen dat de wereld minder voorspelbaar is geworden – integendeel: ons begrip van deze vreemde wereld steunt op een groot pak experimenteel bewijs.

Numerieke voorspellingen komen uit tot vele cijfers na de komma. De inzichten uit de kwantummechanica hebben ook geleid tot toepassingen: het foto-elektrisch effect heeft ons de CCD-camera gebracht, het atoommodel brengt ons lasers in al hun toepassingen, en de getemde elektronen benutten we in performante computerchips, om maar enkele voorbeelden te noemen.

De kwantummechanica biedt ons dus een zeer correcte wetenschappelijke, maar met “gezond verstand” onbegrijpelijke, beschrijving van de werkelijkheid.



© 2013 Uitgeverij Acco
MeNS wordt uitgegeven door Uitgeverij Acco, de inhoud, wetenschappelijke correctheid en popularisatie wordt verzorgd door Bio-MENS vzw.

www.uitgeverijacco.be
www.biomens.eu

Academische begeleiding

Prof. Dr. Roland Caubergs, Universiteit Antwerpen
roland.caubergs@uantwerpen.be

Hoofdreductie

Dr. Ing. Joeri Horvath, Universiteit Antwerpen
joeri.horvath@uantwerpen.be

Kernredactie

Lic. Karel Bruggemans, VRT
Prof. Dr. Roland Caubergs, Universiteit Antwerpen
Dr. Guido François, Universiteit Antwerpen
Prof. Dr. Geert Potters, Hogere Zeevaartschool
Dr. Lieve Maesele, Hogeschool Gent
Lic. Els Grieten, Universiteit Antwerpen
Lic. Chris Thoen, middelbaar onderwijs
Ir. Marjolein Vanoppen, Universiteit Gent
Ir. Ariane Ooms, middelbaar onderwijs en Universiteit Antwerpen
Prof. Dr. Diane Van Strydonck, Universiteit Antwerpen
Prof. Dr. Renaat Gijbels, Universiteit Antwerpen

Communicatiecoördinator Bio-MENS

Kaat Vervoort
Herrystraat 8b, 2140 Antwerpen
Tel. +32 (0)3 609 52 30
Fax +32 (0)3 609 52 37
contact@biomens.eu

Algemene coördinatie

Dr. Sonja De Nollin
Tel. +32 (0)495 23 99 45
sonja.denollin@uantwerpen.be

Abonnementenadministratie

Voor België en Nederland:
Uitgeverij Acco
Blijde Inkomststraat 22, 3000 Leuven
Tel. 016 62 80 00
Fax 016 62 80 01
uitgeverij@acco.be
Abonnementen worden stilzwijgend voor één jaargang verlengd. Opzeggen doet u uitsluitend via mail naar uitgeverij@acco.be, uiterlijk op 31 januari van de lopende jaargang.

Abonnementsprijzen (4 nummers):

Gewoon jaarabonnement: € 35 incl. btw
Educatief jaarabonnement: € 25 incl. btw
Losse nummers: € 9,95 incl. btw per nummer

Advertentietarief:

Voor meer informatie neemt u contact op met uitgeverij Acco.

Omslagontwerp en vormgeving:

Peter Faes - www.odevie.com
Uitgeverij Acco

Losse nummers

t.e.m. MeNS 81 te bestellen bij Bio-MENS vzw.



Ontdek ons volledige opleidingsaanbod
op uantwerpen.be/opleidingsaanbod
T +32 (0)3 265 48 72



Universiteit
Antwerpen



Infodag geneeskunde

15 februari

Open lesdagen

3 tot en met 7 maart

Open campusdagen

22 maart en 26 april

Meer weten?

uantwerpen.be/infomomenten

T +32 (0)3 265 48 72



Universiteit
Antwerpen

MENS

komt naar je toe!

Christiaan Thoen, bioloog, ondervoorzitter van Bio-MENS vzw en coauteur van MeNS brengt de nieuwste updates van wetenschappelijke, technologische en milieugebonden fenomenen naar je school, vereniging of instelling. Bio-MENS vzw biedt 8 verschillende lezingen aan:

- Biodiversiteit in de knoei
- Eet je gezond!
- Exoten in opmars
- Bijenzaken aan ons hoofd
- Technologie voorbij de grenzen van het kleine: spelen met atomen en genen
- Eerlijk eten
- Kanker, de vijand binnenin
- Biomimicry, de natuur als leermeester voor duurzame innovaties (*sluit perfect aan bij De Jonge Baekeland 2014!*)

Doelgroep: scholen (vanaf 4de jaar SO), verenigingen en instellingen

Kostprijs: 125 euro per lezing (excl. verplaatsingskosten)

Datum: vrij te kiezen in functie van beschikbaarheid

Duur: 2 (les)uren

Meer info: www.biomens.eu



MENS90

Dossier op komst: Werken aan een groener land

- ...
- 55 Muizenissen en knaagzangen
 - 56 Schoon verpakt, lekker gegeten
 - 57 Brein
 - 58 Illusies te koop
 - 59 Je sigaret of je leven
 - 60 Luchtvervuiling
 - 61 Griep, een doderoep op de loer?
 - 62 Vaccinatie, reddingslijn of dwaallicht?
 - 63 Boordevol energie
 - 64 Een graadje warmer. Quo vadis, Aarde?
 - 65 Energie in het zonnetje
 - 66 ADHD, als chaos overheerst
 - 67 Duurzaam... met kunststoffen
 - 68 Aspecten van evolutie
 - 69 Seksueel overdraagbare aandoeningen
 - 70 Groene Chemie
 - 71 Invasieve soorten
 - 72 Jongeren durven innoveren
 - 73 Op weg naar Mars
 - 74 Waarheen leidt het spoor?
 - 75 Als het bloed niet meer stroomt
 - 76 PVC: harmonie van duurzaamheid en design

- 77 Mariene biodiversiteit
- 78 Systeembioologie
- 79 Bijen
- 80 (Over)Bevolking
- 81 Overbevissing
- 82 Eerlijk eten
- 83 Bamboe
- 84 Kanker, de vijand binnenin
- 85 Biomimicry
- 86 Gehoor en gehoorproblemen
- 87 Geneesmiddelen
- 88 Kankerbehandeling



O+DEVE 03 322 08 60