



Nederlands Tijdschrift voor

Natuurkunde

februari 2009-jaargang 75-nummer 2

Dans der elektronen

Een zwaar Bohratoom

De hardnekkige kilogram

Uitgave van de
Nederlandse Natuurkundige Vereniging
75^e jaargang (2009), nummer 2

NNV-bureau

lidmaatschappen en abonnementen

Nederlandse Natuurkundige Vereniging
Noortje de Graaf (verenigingsmanager)
Anja Al, Debora van Galen Last (secretaresse)
Postbus 41882
1009 DB Amsterdam
TELEFOON 020 59 222 11
FAX 020 59 251 55
EMAIL bureau@nnv.nl
INTERNET www.nnv.nl/

Redactiesecretariaat NTvN

artikelen en advertenties

Nederlands Tijdschrift voor Natuurkunde
Esger Brunner/ Marieke de Boer
Science Park 105, kamer N351
Postbus 41882
1009 DB Amsterdam
TELEFOON 020 59 222 50
FAX 020 59 251 55
EMAIL ntvn@ntvn.nl
INTERNET www.ntvn.nl

Redactie

Rob van den Berg, Shell Amsterdam
Claud Biemans, Amsterdam
Marieke de Boer, *bureaudirecteur*
Lo Bour, AMC
Helko van den Brom, NMi
Esger Brunner, *eindredacteur*
Menno van Dijk, Shell Amsterdam
Aernout van Enter, RUG
Vincent Icke, UL
Sijbrand de Jong, RUN
Machiel Kleemans, Brill
Stefan Kowalczyk, TUD
Herman de Lang, Rotterdam
Bas van Lieshout, McKinsey
Tim Marcus, VUmc
Dirk Poelman, U Gent (B)
Wilfried van Sark, UU
Peter Siegmund, KNMI
Coen Swarts, TH-Rijswijk
Jos Thijssen, TUD
Michiel Thijssen, Brill
Erno Vandeweerdt, Europese Commissie
Bram Wouters, University of Cambridge
Wim van der Zande, RUN, *hoofdredacteur*

Vormgeving Ori Ginale/Marc de Boer
Opmaak EB/MdB
Druk AlfaBase, Alphen aan den Rijn
Oplage 4000

 Nederlandse
Natuurkundige
Vereniging

Het natuurkundige brein

De hersenen van Albert Einstein zijn bewaard gebleven met de bedoeling deze nog ooit eens te kunnen te ontsluiten en daarmee het geheim van deze geniale geest te kunnen ontrafelen. Meer dan 50 jaar na Einstein's dood lijkt echter het idee om ergens een zogenaamde 'natuurkundeknobbeltje' te kunnen aantonen verder weg dan ooit. Is er wel zoiets als een 'natuurkundeknobbeltje'? En wat is er zo natuurkundig aan een brein? Zijn er overeenkomsten in hersenen tussen natuurkundigen? En als dat zo is wie waren dan de natuurkundigen van bijvoorbeeld 50000 jaar geleden? Zijn onze hersenen veranderd in al die duizenden jaren? Of is er niet zoiets als een natuurkundig brein, maar meer een brein dat zich blijft verwonderen, dat blijft onderzoeken, analyseren en modelleren?

Ja, erg veel vragen over een orgaan waar we maar bijzonder weinig van begrijpen, maar dat we wel nodig hebben om al die natuurkunde om ons heen te begrijpen. Want wat deze natuurkundige breinen doen is structuur aanbrengen in onze wereld, de chaos verdrijven. Het is wel wonderbaarlijk dat je een orgaan bezit, dat gewoon aan de gang gaat en de wereld onderwerpt aan wetten. Er draaien programma's in ons brein die streven naar structuur. Maar vreemd genoeg is de structuur in het orgaan dat die structuur schept nog steeds niet echt ontrafeld. De enorme toename in de kennis over onze hersenen de afgelopen 50 jaar, heeft zeker een aantal mechanismen blootgelegd, maar wat bewustzijn is en wat creatief denken inhoudt, is nog steeds een groot raadsel.

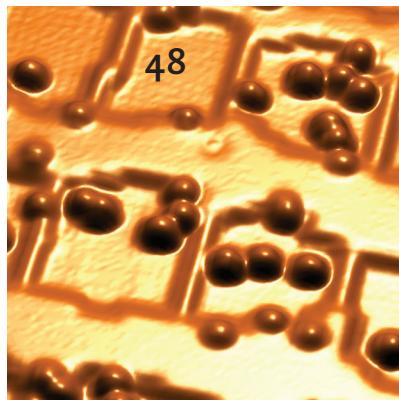
Er lijken ook geen machines vorhanden die ons een analogon verschaffen voor onze hersenen, want het brein werkt geheel anders dan een computer. Zo is het bijvoorbeeld wat energieverbruik en prestatie betreft zonder meer uitzonderlijk. Een ruwe rekensom leert ons dat de hersenen een rekenkapaciteit hebben van tientallen petaflops (flops=floating point operators per seconde) en een opslagcapaciteit van duizenden terabytes bij een energieverbruik van ongeveer 30 Watt. De rekenkapaciteit van de huidige computer is ongeveer 1 teraflop (factor 10^4 minder) met een opslagcapaciteit van ongeveer een terabyte (factor 10^3 minder) bij een energieverbruik van rond de 100 Watt. Computers zullen zeker nog wel weer beter worden, maar het blijft toch zeer indrukwekkend dat dit allemaal mogelijk is in een ruimte niet groter dan een voetbal! En dan hebben we het alleen nog maar over een aantal getallen en gaan we voorbij aan de eigenschappen van deze hersenen ofwel wat er aan prestaties geleverd wordt. Zo bezitten onze hersenen eigenschappen die wij (nog) niet kunnen implementeren in robots, zoals plasticiteit, dynamische connectiviteit en zelforganisatie.

En waar zit dan de natuurkunde in ons brein? Ja, een natuurkundigen waardig probleem. Denk met je hersenen eens over je eigen hersenen na! Deze structuur is zo wonderbaarlijk dat dit orgaan een speciale aanpak vereist en roept om verder fundamenteel onderzoek en dan met een latere eens zeggen 'natuurkundige' inslag. Misschien zul je je afvragen wat er dan wel zo natuurkundig is aan een brein, want in de hersenen gaat het helemaal niet over het standaardmodel of de relativiteitstheorie. Dit is levende materie en die is niet volledig te vatten in de wetmatigheden van de dode materie. Van de andere kant zou je echter denken van wel, omdat deze structuur wel in staat is wetmatigheden in de materie te ontdekken. Naar mijn idee is dus onderzoek naar het functioneren van onze hersenen een waardig natuurkundig probleem. Wij natuurkundigen moeten tenslotte zo slim zijn dat we ook begrijpen waarom we zo slim zijn. Bovendien hebben dan de hersenen van Albert Einstein tenminste niet voor niets zo lang op sterk water gestaan.

Lo Bour



Bij de omslag:



Met behulp van *Scanning Tunneling Microscope (STM)* opnames is het mogelijk individuele 'Kondo atomen' te bestuderen. Hiernaast zien we een STM opname van individuele kobalt atomen op eilandjes van isolerend kopernitride bovenop een oppervlak van puur koper.

	36	Zonnecelrendementen in perspectief	John Schermer
frontlinie	40	Een zwaar Bohratoom	Ofelia Vieitez, Toncho Ivanov, Elmar Reinhold, Kees de Lange en Wim Ubachs
nieuws	43	Rubicon en Vici subsidies toegekend	
	44	De langdurige wedijver tussen lens- en spiegeltelescopen	Alexander Vermeulen
frontlinie	48	Dans der elektronen	Sander Otte
	50	Einstein vergat wel eens een minnetje	Jonathan Zondag
column	53	Grenzen aan persoonsgebonden steun?	Wim van der Zande
reacties	54	Natuurkunde en innovatie bij het energieverbruik van de automotor (1-4)	Arnoud Carp, Bart Roossien, Henk Boddendijk en Lo Bour
ken uw klassieken	56	Poincaré en het drielichamenprobleem	Herman de Lang
fysica 2009	60	programma	
reactie	61	Wie zaait zal oogsten	Eppo Bruins
	62	De hardnekkige kilogram - het SI op de schop	Inge van Andel, Helko van den Brom en Gert Rietveld
	67	Agenda	

35

Het Nederlands Tijdschrift voor Natuurkunde is het maandelijkse tijdschrift van de Nederlandse Natuurkundige Vereniging en richt zich op de Nederlandstalige natuurkundige gemeenschap. Ingezonden artikelen, recensies, discussies en mededelingen – op het gebied van de natuurkunde in brede zin – zijn welkom. Inzendingen kunnen worden gestuurd naar het redactiesecretariaat, of naar redactieleden. Richtlijnen voor auteurs staan

op <http://www.ntvn.nl/>, of zijn op te vragen bij het redactiesecretariaat.

De redactie behoudt zich het recht voor om artikelen te weigeren, in te korten of anderszins te wijzigen zonder opgave van reden.

De auteursrechten van de artikelen in dit tijdschrift liggen bij de desbetreffende auteur(s).

Echter, artikelen kunnen geplaatst worden op de internetpagina's:

- <http://www.natuurkunde.nl/>
- <http://www.kennislink.nl/>

Niets van deze uitgave mag op welke wijze dan ook gekopieerd of verveel-vuldigd worden zonder nadrukkelijke toestemming van de auteur(s).

Zonnecelrendementen in perspectief

Een zonnecel zet lichtenergie rechtstreeks om in elektrische energie. Van alle vormen van duurzame energie hebben zonnecellen de grootste potentie om blijvend te voldoen aan de wereldwijde energiebehoefte. Echter, in West- en Midden-Europa zijn de kosten voor elektriciteit met de huidige generatie zonnepanelen 0,50 à 0,60 €/kWh zodat zonnestroom nog niet kan concurreren met de gangbare elektriciteitsprijs van circa 0,20 €/kWh. Om het enorme potentieel aan zonne-energie te kunnen oogsten, moet het rendement van de cellen omhoog en hun productiekosten omlaag.

John Schermer

Halfgeleiders en zonnecellen

Een halfgeleiderkristal heeft een stabiele structuur waarbij alle elektronen sterk aan hun plaats gebonden zijn. Er is voldoende energie nodig om een elektron uit deze vaste positie los te slaan zodat deze vrij door het kristalsooster kan bewegen. Hiertoe dient een, voor elk halfgeleidermateriaal specifieke, energiebarrière (de bandafstand) te worden overbrugd. Op de oorspronkelijke positie van het elektron blijft een gat met een positieve ruimtelading achter. Deze positie kan eenvoudig worden ingenomen door een naburig elektron. Dit laatste proces herhaalt zich zodat ook het posi-

tief geladen gat zich als het ware vrij door het kristal beweegt. Om geleidbaarheid van een halfgeleider te vergroten wordt het gedoteerd. Hierbij wordt een beperkt deel van de oorspronkelijke atomen vervangen door atomen met een valentie-elektron meer (n-type halfgeleider) of minder (p-type halfgeleider) in de buitenschil. Een zonnecel bestaat uit een laag halfgeleidermateriaal waarin een p-n overgang (p-n junctie) is aangebracht door de ene kant n-type en de andere kant p-type te doten (zie figuur 1). Bij het doten wordt typisch minder dan één op de miljoen atomen vervangen. Het halfgeleidermateriaal zelf moet dus zeer zuiver zijn om goed gecontroleerd te kunnen doten. Door de hiervoor benodigde zuiveringsprocessen zijn halfgeleiders relatief kostbare materialen. Daarom is het streven naar een minimaal gebruik van halfgeleidermateriaal om een hoeveelheid elektriciteit te genereren een belangrijk gegeven bij de productie van zonnecellen.

Rendement

Het rendement van een zonnecel is de verhouding tussen de gegenereerde elektrische energie en

de op het celoppervlak ingestraalde lichtenergie. Wereldwijd wordt er veel onderzoek verricht naar het behalen van het maximale rendement voor verschillende typen zonnecellen. Het onderzoek richt zich niet alleen op materialen met de hoogste rendementen omdat bepaalde materialen met lage rendementen potentieel veel goedkooper te produceren zijn. Op deze wijze heeft elk materiaalsysteem zijn eigen recordrendement. Regelmäßig duiken er in publicaties recordclaims op voor cellen waarvan het rendement op een onduidelijke wijze is bepaald of waarbij een afwijkende definitie van het rendement wordt gehanteerd. Om dit te ondervangen bestaat er een geautoriseerde lijst met recordrendementen; de 'Solar Cell Efficiency Tables'. Deze rendementtabellen worden sinds 1993 eens per half jaar bijgewerkt en gepubliceerd in 'Progress in Photovoltaics: Research and Applications', een vaktijdschrift voor zonnecelonderzoekers [1]. Alle rendementrecords in deze tabellen zijn op een eenduidige wijze gemeten aan een van de zes internationaal erkende zonnecel testcentra in de wereld. De metingen vinden plaats onder zogenoemde standaard testcondities (STC), dat wil zeggen onder de gestandaardiseerde Air-Mass 1.5

John Schermer studeerde Natuurkunde aan de Technische Universiteit Eindhoven en specialiseerde zich in de stromingsleer en halfgeleiderfysica. In 1991 startte hij zijn promotieonderzoek naar de depositie van synthetisch diamant vanuit de gasfase aan de Radboud Universiteit Nijmegen. Sinds 1996 leidt hij op de afdeling Applied Materials Science van deze universiteit het onderzoek naar hogorentament III-V zonnecellen.

J.Schermer@science.ru.nl



spectrale verdeling van het licht met een totale intensiteit van 1000 W/m^2 en bij een temperatuur van 25°C . Figuur 2 toont voor verschillende materialen de toename van het rendement in de loop van de tijd.

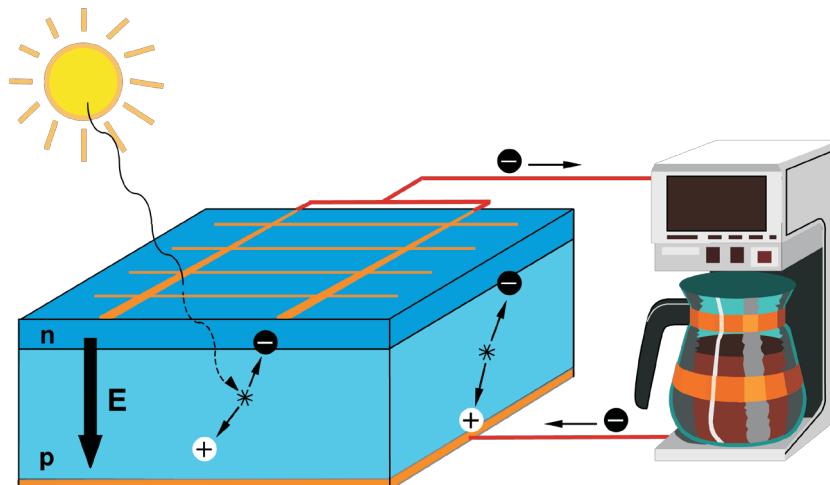
Van lab naar industrie

In het laboratorium bereikte rendementrecords geven aan wat experimenteel haalbaar is met een bepaald materiaalsysteem. Het is vervolgens aan de industrie om de meest veelbelovende ontwikkelingen om te zetten naar een betaalbaar zonnepaneel. Behalve het haalbare rendement spelen hierbij natuurlijk de kosten voor de verschillende materialen en de beschikbare productieprocessen een doorslaggevende rol. Bij de omzetting naar productie worden de meest kostbare processtappen weggelaten of vervangen door een goedkoper alternatief. Als gevolg hiervan zijn door de industrie geproduceerde zonnecellen veel goedkoper dan de overeenkomstige laboratoriumcellen maar hebben ook een lager rendement omdat uit kostenoverwegingen niet het maximale uit het materiaal wordt gehaald.

Kristallijn silicium cellen

De bandafstand van kristallijn silicium (c-Si) past behoorlijk goed op het door de zon ingestraalde energiespectrum. Dit betekent dat met c-Si cellen hoge rendementen worden behaald. Het hoogste rendement van 25.0% is in 1999 bereikt met monokristallijn silicium (mono-Si) aan de University of New South Wales (UNSW) in Australië (zie figuur 2). In productie worden er met zonnepanelen op basis van mono-Si rendementen van 16-18% behaald. Uit kostenoverweging wordt overigens vaak multikristallijn (multi-Si) gebruikt dat bestaat uit meerdere met elkaar versmolten silicium kristallen. In productie halen multi-Si panelen typisch rendementen van 14-16%.

Meer dan 90% van alle commercieel geproduceerde zonnecellen is gebaseerd op het gebruik van c-Si plakken of wafers met een dikte van circa $250 \mu\text{m}$. Dit wijst erop dat vooralsnog met dit materiaalsysteem in een productieomgeving de beste prijs-prestatieverhouding wordt bereikt dat wil zeggen de laagste kosten per hoeveelheid gegenereerde elektrische energie. Kristallijn silicium heeft echter een funda-

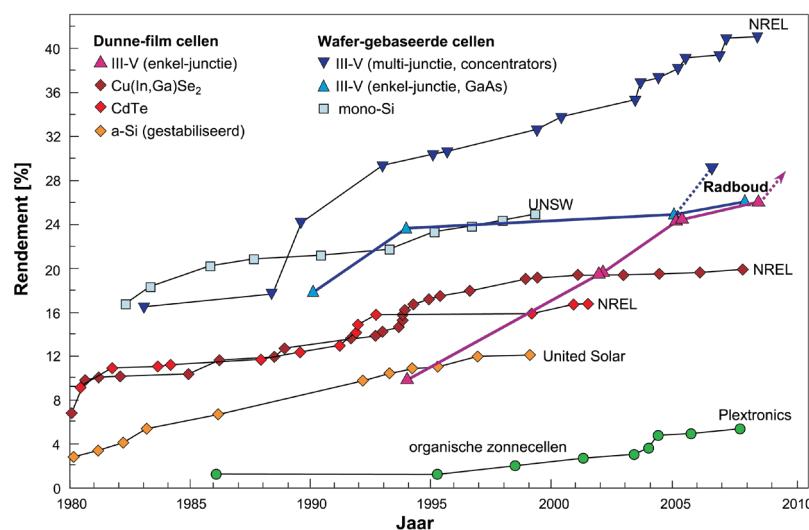


Figuur 1 Een zonnecel bestaat uit een plak halfgeleidermateriaal met een p-n junctie waardoor een inwendig elektrisch veld (E) ontstaat. Door de absorptie van licht in de zonnecel worden elektronen losgeslagen uit hun vaste positie in het kristalrooster en ontstaan er vrije elektronen (negatief) en gaten (positief). De elektronen en gaten ondergaan een versnelling in het elektrische veld en bewegen daardoor elk naar een andere kant van de cel. Aan het uiteinde van de cel wordt de elektronenstroom afgevoerd via metaalcontacten (in een metaal vindt geen gatentransport plaats). Na het verrichten van nuttige arbeid in een uitwendig elektrisch circuit komen de elektronen terug aan de andere kant van de cel waar ze recombineren met de daar aanwezige gaten. De bovenkant van de cel is slechts gedeeltelijk gemetalliseerd (grid-contactpatroon) omdat het licht tussen de metaallijnen de cel moet kunnen binnendringen.

menteel nadeel voor de toepassing in zonnecellen, het is een zogenaamde indirecte halfgeleider. Dit houdt in dat er voor het exciteren van een elektron behalve een foton met voldoende energie gelijktijdig ook een fonon (gekwantiseerde kristalroostertrilling) nodig is voor de impulsüberdracht. De

kans op deze drieëlertjes interactie is relatief klein zodat er een vrij dikke laag hoogzuiver c-Si nodig is om al het bruikbare licht te absorberen (typisch $200 \mu\text{m}$ voor 95% absorptie). Dit gegeven staat haaks op het streven naar een minimaal gebruik van kostbaar halfgeleidermateriaal.

37



Figuur 2 Toename van het zonnecelrendement voor verschillende materialen zoals gemeten over een periode van 30 jaar bij het erkende testcentrum van het National Renewable Energy Laboratory (NREL) in de Verenigde Staten [2]. Bij elke lijn in de figuur is de naam van het instituut vermeld waar de cel met het hoogste rendement is geproduceerd. Voor de meeste materiaalsystemen vlakt de rendementstoename af omdat deze hun theoretische maxima naderen. Alleen voor III-V cellen stijgt het rendement nog significant en is de 50% grens het volgende target. Ter vergelijking zijn ook de resultaten weergegeven zoals behaald aan de Radboud Universiteit Nijmegen (dikke blauwe en paarse lijnen) en bevestigd door metingen aan het erkende testcentrum van het Fraunhofer Instituut in Freiburg.

Dunne-film cellen

Voor de meeste directe halfgeleiders is een dunne-film van maximaal enkele micrometers dik voldoende om het bruikbare licht te absorberen. Het ligt dus voor de hand om deze materialen te gebruiken voor de productie van zonnecellen. De hiervoor meest toegepaste materialen zijn amorf silicium (a-Si), cadmium-telluride (CdTe) en samengestelde materialen op basis van de elementen koper, indium, gallium en seleen of in sommige gevallen zwavel. De laatste materiaalgroep wordt aangeduid met CIGS (CuInGaSe). Voor de verwerking tot zonnecellen worden de dunne-film materialen meestal gedeponeerd op glasplaten (batch productie) of metaalfolies (roll-to-roll productie). Er is een grote range aan depositietechnieken beschikbaar, elk met specifieke voor- en nadelen ten aanzien van het te behalen rendement en de productiekosten.

Uit figuur 2 blijkt dat in het laboratorium met CIGS en CdTe rendementen van bijna 20% worden behaald. Een belangrijk fundamenteel nadeel van deze dunne-film cellen is echter dat het polykristallijne of amorfse materialen zijn. De korrelgrenzen tussen de kristallen en onverzadigde bindingen manifesteren zich als defecten. Elkaar

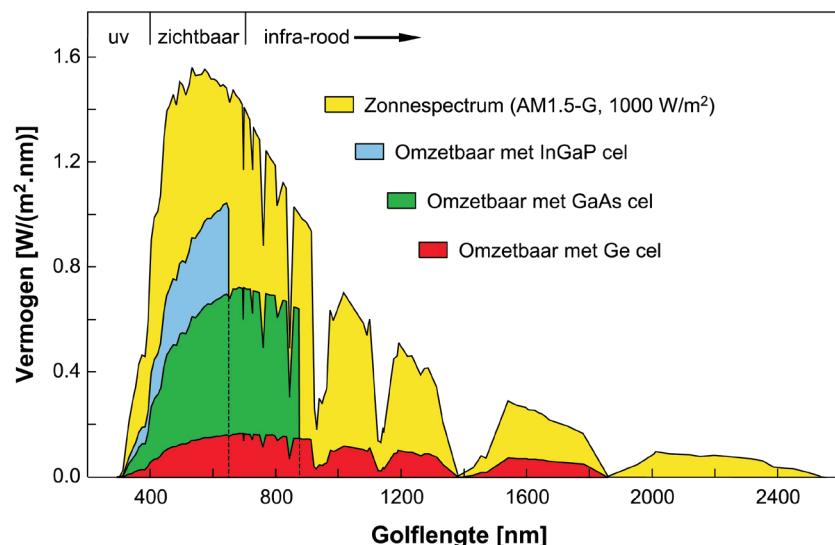
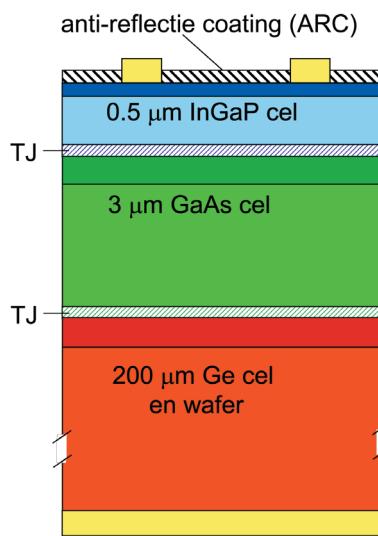
passerende vrije elektronen en gaten die eerder door absorptie van zonlicht zijn gegenereerd, worden door deze defecten afgeremd en recombineren daardoor sneller met elkaar. Deze interne recombinatie resulteert in lagere rendementen dan met c-Si wordt behaald. Op kleine schaal in het laboratorium zijn de defecten nog enigszins te omzeilen maar in grootschalige productie blijkt dit een moeilijke opgave en blijft het rendement vooralsnog steken op 5.5-6.5% voor a-Si, 7-9% voor CdTe en 10-11% voor CIGS [3].

III-V cellen

Vanuit fundamenteel oogpunt is voor een optimale zonnecel een directe halfgeleider met een perfecte kristalstructuur nodig. Aan deze beschrijving wordt voldaan door zogenoemde III-V halfgeleiders. Dit zijn materialen die bestaan uit een één-op-één combinatie van elementen uit groep III (aluminium, gallium en indium) en groep V (stikstof, arseen en fosfor) van het periodiek systeem. Op basis van deze elementen kan een grote variëteit aan materialen worden samengesteld, GaAs, InGaP, InGaNAs etc., zolang hierin het aantal atomen van groep III maar gelijk is aan dat van groep V. De samenstelling en daarmee de eigenschappen van deze materialen kun-

nen worden afgestemd op de wens van de gebruiker. Het materiaal dat wat bandafstand betreft het beste past bij de energieverdeling van het zonnespectrum is GaAs. Het is dus niet verwonderlijk dat in 2007 de zonnecelonderzoeksgrond van de Radboud Universiteit Nijmegen juist met dit materiaal een recordrendement van 26.1% heeft bereikt [1]. Dit is van alle materialen wereldwijd het hoogste rendement dat met een enkelvoudige zonnecel is bereikt, maar het kan nog beter.

III-V materialen zijn namelijk bijzonder geschikt om meervoudige (multijunctie) zonnecellen van te maken. Dit is een stapeling van meerdere zonnecellagen, elk met een andere bandafstand waardoor ze gevoelig zijn voor verschillende delen van het zonnespectrum [4]. Per oppervlak kan zo een groter deel van het invallende zonlicht worden omgezet in elektrische-energie (zie figuur 3). Op deze wijze is er door Spectrolab in de Verenigde Staten met een tripel-junctie cel het record van 32% voor een zonnecel onder STC gehaald [1]. Vanwege de extreem hoge kosten werden III-V zonnecellen in eerste instantie alleen in de ruimtevaart toegepast. De hiervoor geproduceerde cellen hebben typisch een rendement van 29-30% onder STC.



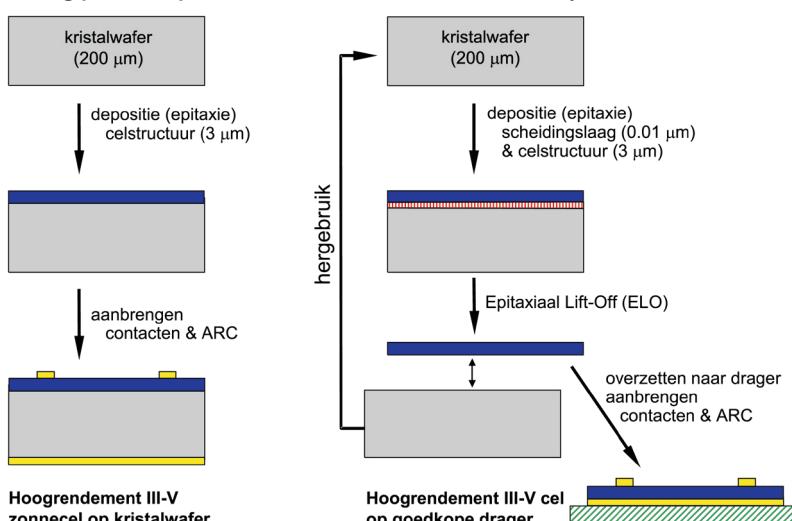
Figuur 3 Doorsnede (links) en het theoretische omzetrendement (rechts) van een tripel-junctie zonnecel. Speciale III-V tunnel-junctie structuren (TJ) fungeren als transparante contacten tussen de cellagen. In de grafiek is de energieverdeling van het standaard zonnespectrum weergegeven. Het gele oppervlak onder deze kromme is 1000 W/m^2 . Het groene oppervlak geeft aan hoeveel hiervan theoretisch door een enkelvoudige GaAs cel kan worden omgezet in elektrische energie (28%). De blauwe en rode oppervlakken geven aan wat hieraan door de InGaP en Ge lagen van de tripel-junctie cel wordt toegevoegd voor een totaalrendement van 40% onder STC. De theoretische waarden zijn berekend op basis van het diodemodel [5]. Dit model geeft realistische limietwaarden voor het experimenteel haalbare rendement. Veel andere modellen negeren de verliesfactoren gerelateerd aan het diodegedrag van de zonnecel en komen hierdoor uit op significant hogere maar weinig realistische theoretische limieten voor de experimenteel haalbare rendementen.

Cellen onder concentratie

Door hun specifieke eigenschappen (multi-junctie, hoge warmtebestendigheid en hoge rendement) zijn III-V cellen bij uitstek geschikt voor toepassing onder geconcentreerd licht. Hierbij doet zich het bijzondere verschijnsel voor dat bij een toename van de lichtintensiteit de elektrische output van de cellen meer dan evenredig stijgt en dus het rendement toeneemt. Gebruikmakend van dit verschijnsel is door NREL het absoluut hoogste zonnecelrendement van dit moment bereikt, 40.8% met een InGaP/GaAs/InGaAs zonnecel bij een concentratiefactor van 140 dat wil zeggen een instraling van 140 maal de standaard intensiteit [1]. In de Solar Cell Efficiency Tables vormen de metingen onder geconcentreerd licht een aparte categorie.

Het concentratieprincipe is niet alleen wetenschappelijk interessant maar wordt ook in praktijk toegepast [4,6]. In concentratorsystemen wordt over een groot oppervlak licht ingevangen op lenzen en/of spiegels en gefocusseerd op een klein oppervlak aan hogrendement zonnecellen. Op deze wijze worden in feite zonnecellen op basis van kostbaar hoogzuiver halfgeleidermateriaal vervangen door goedkope spiegels en lenzen van metaal of kunststof. De potentiële besparing neemt toe met de concentratiefactor. Voor de meest gangbare systemen wordt op dit moment een concentratiefactor 500 toegepast. Deze concentrators zijn roterbaar opgesteld en worden via een trackingsysteem continue op de zon gericht [6]. Dit brengt significantie systeemkosten met zich mee waardoor concentrators 10 jaar geleden alleen rendabel waren in woestijngebieden rond de evenaar met extreem veel directe zoninstraling. Echter, de elektrische output van de systemen neemt evenredig toe met de snel stijgende rendementen van de hierin geïntegreerde III-V cellen (driehunctie cellen met 36% rendement bij een concentratiefactor 500 zijn reeds commercieel verkrijgbaar) terwijl de productiekosten nagenoeg gelijk blijven. Als gevolg hiervan wordt het toepassingsgebied steeds groter. Zo zijn er in Spanje en Italië al velden met concentratorsystemen en staan er test- en demonstratieopstellingen in Zuid-Duitsland [6] en België [4]. Bij voldoende toename van het celrende-

Radboud dunne-film cel proces



Figuur 4 Het huidige productieproces (links) waarbij III-V zonnecelstructuren, inclusief de germanium wafers waarop deze zijn gegroeid, worden verwerkt tot zonnecellen. Bij de nieuw ontwikkelde ELO methode wordt voor de depositie van de zonnecel eerst een etsgevoelige scheidingslaag aangebracht. Op deze wijze kan de zonnecel na depositie met een etsmiddel worden gescheiden van de wafer en worden overgezet op een goedkope glazen of kunststof drager. De III-V film op zijn nieuwe drager wordt verder verwerkt tot een daadwerkelijke dunne-film zonnecel, terwijl de kostbare kristalwafer kan worden hergebruikt voor de groei van de volgende celstructuur.

ment of een significante kostenreductie (zoals beoogd met het hieronder beschreven epitaxiaal lift-off proces) kan ook Nederland binnen het toepassingsgebied komen te liggen.

Dunne-film III-V cellen

Voor een perfecte kristalstructuur worden III-V zonnecelstructuren met een dikte van slechts enkele micrometers epitaxiaal (d.w.z. met een doorlopend kristalrooster) afgezet op germanium kristalwafers [4]. Na depositie van de III-V structuur heeft de wafer geen toegevoegde waarde voor het functioneren van de zonnecel maar wordt samen met de III-V film verwerkt tot een zonnecel (zie figuur 4). Om deze reden wordt de huidige generatie III-V cellen net als c-Si gerekend tot de wafer gebaseerde cellen. Aan de Radboud Universiteit is een epitaxiaal lift-off (ELO) methode ontwikkeld [7] waarmee de kostbare germanium wafers kunnen worden hergebruikt en een echte dunne film III-V zonnecel op een goedkope drager wordt verkregen (zie figuur 4). Aanvankelijk hadden de dunne-film GaAs cellen een rendement van slechts 10% maar inmiddels is dit opgevoerd tot 26.1% (zie figuur 2). Dit is een record voor enkelvoudige dunne-film cellen en een evenaring van het recordrendement voor een reguliere GaAs cel op een wafer waaruit blijkt dat het ELO

proces geen schade toebrengt aan de celstructuur. In Nijmegen wordt nu gewerkt aan de volgende stappen van het onderzoek: de ontwikkeling van dunne-film multi-junctie cellen en het gebruik hiervan onder geconcentreerd licht. In dit kader is er nu op een wafer een dubbel-junctie cel gerealiseerd met een rendement van bijna 30% onder standaard condities (zie ook figuur 2) en is er een meetmethode ontwikkeld om tot een concentratiefactor van 750 maal nauwkeurige metingen te verrichten. De goede resultaten met twee recordvermeldingen in de meest recente editie van de Solar Cell Efficiency Tables [1] hebben in binnen- en buitenland tevens de aandacht getrokken van bedrijven die in samenwerking met de Radboud Universiteit specifieke III-V cellen voor concentrator- en ruimtevaarttoepassingen willen ontwikkelen.

Referenties

- 1 M.A. Green et al., *Prog. Photovolt: Res. Appl.* 17, 85 (2009).
- 2 Figuur bewerkt uit: S. Kurtz, *Photovolt. Int.* 1, 121 (2008).
- 3 S. Hegedus, *Prog. Photovolt: Res. Appl.* 14, 393 (2006).
- 4 W. Geens, *NTvN* 72, 340 (2006).
- 5 M.A. Green, *Solar Cells*, Prentice Hall, New York (1982).
- 6 A.W. Bett et al., *Proc. 33rd IEEE Photovolt. Specialist Conf.*, San Diego, USA (2008).
- 7 J.J. Schermer et al., *Thin Solid Films* 511-512, 645 (2006).

Een zwaar Bohratoom

Iedere natuurkundestudent die voor het eerst met quantummechanica in aanraking komt, wordt geconfronteerd met het Bohrmodel van het waterstofatoom. Daarbij gaat het om toestanden van een elektron. Dit elektron kan vervangen worden door een (zwaarder) H^- -deeltje, zoals onderzoekers aan het Lasercentrum VU laten zien.

Ofelia Vieitez, Toncho Ivanov, Elmar Reinhold, Kees de Lange, Wim Ubachs

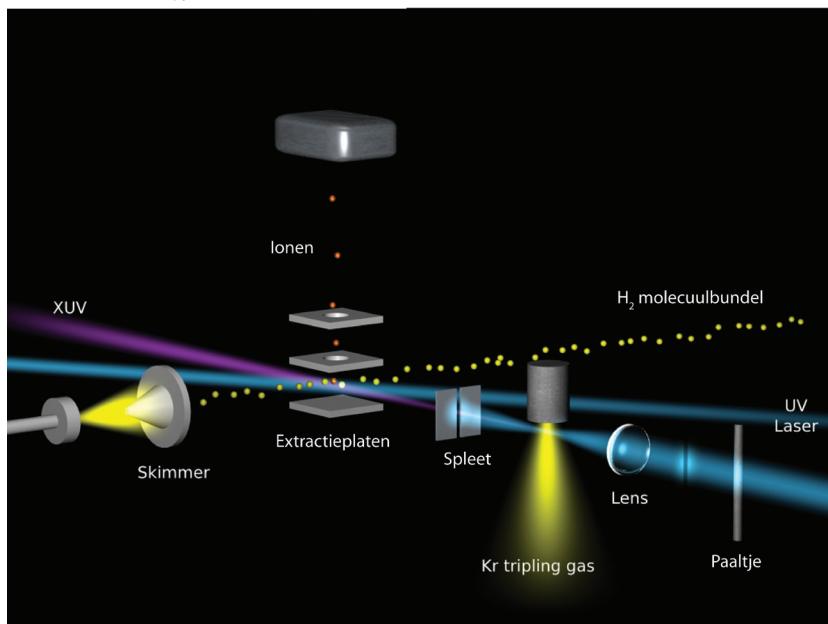
De Coulomb-wisselwerking tussen proton en elektron, de elektrische aantrekking gerepresenteerd door de potentiaal $V_c = -e^2/4\pi\epsilon_0 R$, zorgt voor stabilitet in een atoom. De energie van het systeem kan niet alle waarden aan nemen, en quantumtoestanden aangeduid met hoofdquantumgetal n en met discrete bindingsenergieën doen voor het eerst hun intrede. Dit concept van gebonden toestanden met negatieve energie met daarboven een ionisatiecontinuüm kan eenvoudig generaliseerd worden tot de bekende Rydbergformule:

$$E_n = E_{lim} - \frac{R_A}{n^2} \quad (1)$$

Hierin vertegenwoordigt E_n (met quantumgetal n) een zogenaamde Rydbergreeks die convergeert naar een limietwaarde E_{lim} . Deze simple beschrijving is geldig voor een breed scala van atomaire en moleculaire Rydbergtoestanden, die allemaal gemeen hebben dat de waarde van de Rydbergschaalfactor R_A in essentie constant is voor situaties gekarakteriseerd door een zware kern omcirkeld door een licht elektron:

$$R_A = \left(\frac{\mu}{m_e} \right) R_\infty \quad \text{met}$$

$$R_\infty = \frac{m_e}{2\hbar^2} \left(\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \right)^2 \quad (2)$$



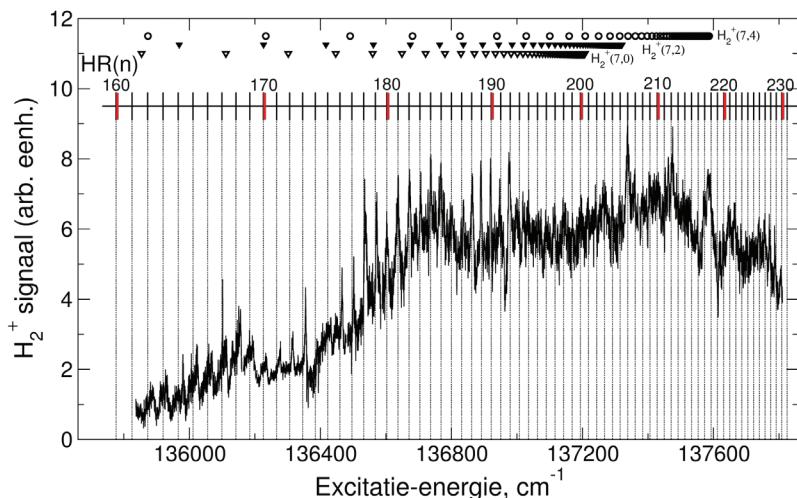
Figuur 1 Overzicht van de experimentele opstelling. Het paaltje en de spleet worden gebruikt om het geproduceerde XUV-licht (via generatie van de 3rd harmonische) te scheiden van het fundamentele licht. De skimmer zorgt ervoor dat een goed gecollimeerde molecuulbundel in de interactiezone komt.

De gereduceerde massa μ (de effectieve massa van het bewegende deeltje waarmee we de combinatie van kern en elektron kunnen beschrijven) is voor deze toestanden in goede benadering gelijk aan de elektronmassa m_e . Vanuit dit perspectief lijken alle atomen en moleculen sterk op elkaar. De $1/n^2$ -schaling is daarbij een gevolg van de $1/R$ -wetmatigheid in de potentiaal. De Rydbergconstante R_∞ bepaalt hoe ver de niveaus uiteen liggen [1].

Zijn er nog andere fysische systemen met een $1/R$ -potentiaal waarbij het Rydbergconcept getest kan worden? Natuurlijk is er de gravitatiepotentiaal, die een centrale rol speelt in de Newtoniaanse hemelmechanica. Het is een leuke oefening om de Rydbergconstante voor de massa M_1 in dit systeem af te leiden:

$$R_g = (GM_1M_2)^2 \frac{M_1}{2\hbar^2} \quad (3)$$

Voor het stelsel van zon en aarde kan dan snel berekend worden dat het overeenkomstige hoofdquantumgetal van de orde $n \sim 10^{74}$ is, zoals verwacht ruimschoots in de klassieke limiet. Voor twee waterstofatomen, uitsluitend gebonden door de gravitatielwisselwerking, is de opsplitsing tussen de laagste twee quantumniveaus 10^{-64} cm⁻¹ of 10^{-68} eV, met in de grondtoestand een Bohrstraal van $3,7 \times 10^7$ lichtjaar, een afstand die nog past binnen de afmetingen van het heelal. De vraag is of er illustraties zijn van de $1/R$ -potentiaal, die wat minder exotisch zijn dan bovenstaande voorbeelden en die bij voorkeur experimenteel toetsbaar zijn.



Figuur 2 Gemeten spectrum waarin het energiegebied van de ‘zware Rydbergtoestanden’ met hoofdquantumgetal $n=162$ tot $n=230$ is te zien. Ter vergelijking zijn ook de theoretische Rydbergwaarden volgens (1) en (2) toegevoegd, aangeduid als $HR(n)$. De andere symbolen (driehoeken en cirkels) geven de posities aan waar ‘gewone’ elektronische Rydbergtoestanden in H_2 (met een aangeslagen H_2^+ core) worden verwacht. In dit spectrum worden die niet waargenomen, in nabijgelegen energiegebieden echter wel.

Het concept van Rydbergtoestanden kan uitgebreid worden naar ‘zware’ systemen. Een systeem van een H^+ -en een H^- -fragment is in feite een waterstofatoom, waarin het elektron vervangen is door een zwaarder H^- -deeltje. In eerder onderzoek werden golfpakketten waargenomen door foto-excitatie van H_2 net onder de dissociatielimiet voor een ionpaar; dit was een indirecte aanwijzing voor zware Rydbergtoestanden [2]. Onlangs hebben we quantumtoestanden in een dergelijk ‘zware Bohratoom’ direct waargenomen [3].

Figuur 1 geeft een overzicht van onze experimentele opstelling. Een gepulste molecuulbundel van zuiver H_2 wordt gekruist met twee laserbundels. Een ervan is een extreem ultraviolette (XUV) bundel, die wordt gegenereerd in de vacuümkamer als derde harmonische van een gepulste UV-laser in kryptongas. De XUV-straling wordt in golflengte op een resonantie in het H_2 molecuul afgestemd, zodat wij de quantumgetallen kennen ($B\ ^1\Sigma_u^+$ of $C\ ^1\Pi_u$ elektronische toestand, met een welbepaald vibratie- en rotatiequantumgetal). Een tweede onafhankelijke UV-laser levert afstembare fotonen voor de tweede excitatiestap, waarmee de H^+H^- zware Rydbergtoestanden worden aangeslagen.

De totale excitatie-energie van de twee lasers is zorgvuldig gekozen: net onder de dissociatielimiet voor een ionpaar ($139713,83\text{ cm}^{-1}$), die berekend

kan worden uit bekende waarden voor de ionisatie-energie van H_2 , de dissociatie-energie van H_2^+ , en de elektronaffiniteit van het H -atoom [3].

Het energiegebied van de H^+H^- -resonanties ligt boven de ionisatie-energie van het neutrale H_2 -molecuul, en na aanslag van de resonantie vervalt het deeltje op sub-nanoseconde tijdschaal naar een H_2^+ -ion en een elektron; op deze manieren detecteren we de zware Rydbergserie. Ook is er nog een ander vervalsschema via dissociatie waarbij twee neutrale waterstofatomen worden geproduceerd; ook deze hebben we gemeten.

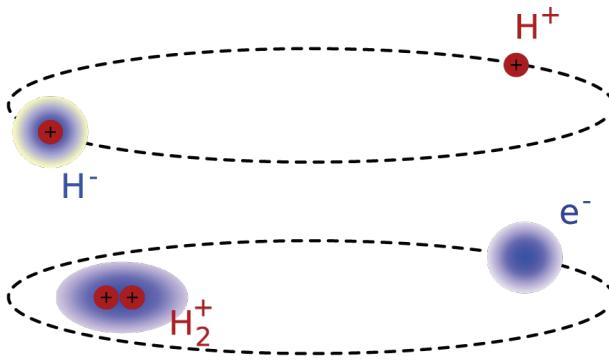
In Figuur 2 worden de experimentele resultaten samengevat. In het energiegebied tussen 134000 - 138000 cm^{-1} zien we bij excitatie, via een specifieke quantum-tussentoestand in H_2 , een lange reeks resonanties op regelmatige afstanden.

Deze resonanties kunnen eenvoudig geïnterpreteerd worden als een Rydbergreeks die convergeert naar de dissociatielimiet van een ionpaar. De resonanties voldoen aan formule (1) voor quantumgetallen $n \sim 160$ - 230 ; alleen moet een

massaschaling plaatsvinden, want het elektron is immers vervangen door een zwaar H^- -deeltje. Die vervanging verandert ook de gereduceerde massa in formule (2). Die wordt nu $\mu = 918,5761\text{ m}_e$, waardoor de Rydbergconstante bijna duizend keer groter wordt dan in een gewoon atoom. Vandaar dat we spreken over een ‘zware Bohratoom’.

Vergelijkbare resonanties kunnen worden waargenomen bij excitatie via verschillende tussentoestanden in H_2 . Dat de Rydbergreeks niet wordt waargenomen voor kleine quantumgetallen (< 100) is goed te begrijpen uit het feit dat het H^- -fragment geen puntlading is. Door de ruimtelijke uitgebreidheid moet de afstand tussen H^+ en H^- meer dan ongeveer 12 atomaire eenheden bedragen om de vorming van een ‘zware’ Rydbergtoestand mogelijk te maken.

Omdat directe excitatie van ‘zware’ Rydbergtoestanden op basis van het Franck-Condonprincipe (dat zegt dat de intensiteit afhangt van de overlap van de golffuncties in de grondtoestand en de aangeslagen toestand) uitermate onwaarschijnlijk is, moet er een ander mechanisme zijn dat na foto-excitatie leidt tot een bezetting van deze quantumtoestanden. Omdat het een experimenteel feit is dat bij excitatie van moleculaire waterstof juist boven de dissociatielimiet voor ionparen ook H^- gedetecteerd wordt, blijkt een koppeling met het ionpaarkanaal aanwezig. Naar de details van dit mechanisme wordt nog onderzoek gedaan, hoewel duidelijk is dat we met een zogenaamde ‘complexe resonantie’ te maken hebben. In dit model speelt elektroncorrelatie een belangrijke rol. Ook onder totaal andere omstandigheden, waar de interactie tussen deeltjes



Figuur 3 Boven: Configuratie van zware Rydbergtoestanden. Onder: Configuratie van ‘gewone’ elektronische Rydbergtoestanden.

Maria Ofelia Vieitez studeerde voor haar Masters aan het Royal Institute of Technology te Stockholm. Daar begon ze ook aan haar PhD, maar rondde dit werk af aan het Lasercentrum VU. Inmiddels werkt ze als PostDoc aan de VU op een ESA-project over spontane Rayleigh-Brillouin verstrooiing in atmosferische gassen.



Toncho Ivanov behaalde zijn Masters aan de Universiteit van Sofia, na ook een stage aan de VU Brussel te hebben gedaan. Hij

werkt nu aan een promotieonderzoek in het Lasercentrum VU over spectroscopie en dissociatie van moleculair waterstof.

Elmar Reinhold studeerde in Münster (Dipl. Phys.) en behaalde zijn Doctorsgraad in het Lasercentrum VU. Heeft daarna in Parijs gewerkt, alsmede bij ESA en bij NIKHEF. Momenteel werkt hij aan onderwijsvernieuwing middelbare scholen via VU en UvA.



Kees de Lange studeerde natuurkunde aan de UvA, was hoogleraar Molecularspectroscopie aan de VU, hoogleraar Laserspectroscopie aan de UvA, en is nu gasthoogleraar aan de VU.

Wim Ubachs behaalde zijn Doctorsgraad in Nijmegen en is nu hoogleraar Atoom, Molecuul en Laserfysika aan de VU en directeur van het Lasercentrum VU.



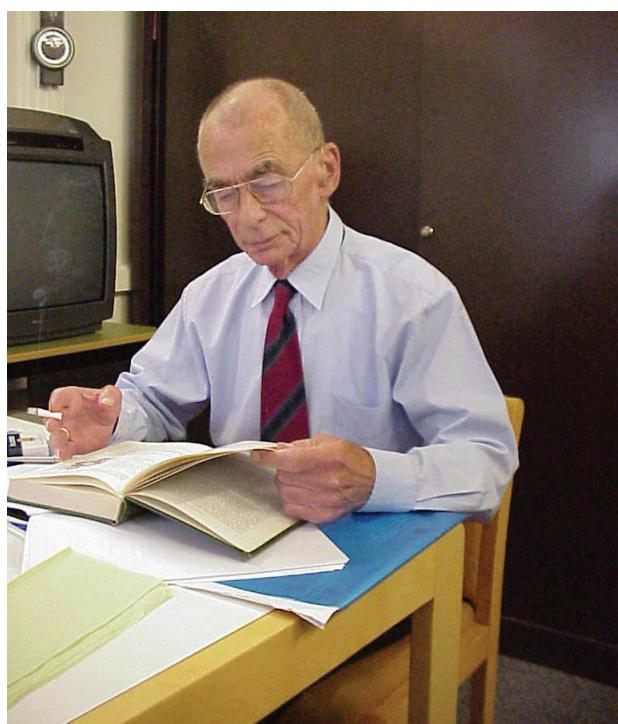
wimu@few.vu.nl

tjes door een $1/R$ -potentiaal beschreven wordt, kan sprake zijn van ‘zware’ Rydbergtoestanden. Te denken valt aan het proton-antiprotonpaar ($p\bar{p}$), waarvoor de Rydbergconstante gelijk is aan die van H^+H^- . In recente botsingsexperimenten tussen antiprotonen en neutrale edelgassen worden eerst een aantal elektronen door de impact van de botsing verwijderd, waarna het antiproton gebonden

wordt in de resterende Coulombpotentiaal. Het stralingsverval dat vervolgens optreedt, vindt stapsgewijs plaats via ‘zware’ Rydbergtoestanden [4]. Zoals zo vaak in de natuurkunde, blijft het boeiend dat een relatief eenvoudig concept de sleutel vormt tot een gedetailleerd begrip van al deze op het eerste gezicht totaal ongerelateerde verschijnselen.

Referenties

- 1 T.R. Gallagher, ‘Rydberg Atoms’, Cambridge University Press (1994).
- 2 E. Reinhold, W. Ubachs, *Phys. Rev. Lett.* **88**, 013001 (2002); zie ook *NTvN* **68**, 118 (2002).
- 3 M.O. Vieitez, T.I. Ivanov, E. Reinhold, C.A. de Lange, W. Ubachs, *Phys. Rev. Lett.* **101**, 163001 (2008).
- 4 D. Gotta, K. Rashid, B. Fricke, P. Indelicato, L.M. Simons, *Eur. Phys. J. D* **47**, 11 (2008).



Joop Los

1922-2009

Vrijdag 9 Januari is Professor Joop Los op 86 jarige leeftijd overleden. Joop Los was gedurende zijn gehele carrière verbonden aan het FOM Instituut voor Atoom- en Molecuul Fysica in Amsterdam, voor een lange tijd als wetenschappelijk directeur en de laatste jaren als algemeen directeur.

Rubicon en Vici subsidies toegekend

Afgelopen december heeft het NWO dertig Rubicon en dertig Vici subsidies uitgereikt.

Rubicon

Rubicon subsidies worden uitgereikt aan pasgepromoveerde Nederlandse onderzoekers om onderzoekservaring op te doen in het buitenland. Buitenlandse onderzoekers kunnen met de subsidie onderzoek doen in Nederland. Hieronder volgen de toegekende subsidies met een natuurkundige component:

Nano-elektronica met DNA

H.B. Akkerman, RUG -> Stanford University, Chemical Engineering (VS).

Rotatie van sterren in de vorming van sterren en planeten

S.H. Albrecht, Sterrewacht Leiden -> Massachusetts MIT - Astrophysics and Space Research (VS).

Het detecteren van een enkel molecuul door plasmonische nanokristallen

X.Y. Ling, UT -> University of California, Berkeley, Chemistry (VS).

Plastic kieten met licht

A.U. Stradomska, Kraków (Polen) -> RUG - Zernike Institute for Advanced Materials (NL).

Vici

Vici subsidies worden toegekend aan vernieuwende onderzoekers. Met de subsidie van maximaal 1.250.000 euro kunnen ze in vijf jaar tijd een eigen onderzoeksgroep opbouwen. Hieronder de projecten met een natuurkunde component:

Samenwerkende eiwitten - Peter Bolhuis, UvA - Computational Physics and Chemistry

Eiwitten zijn veelzijdige moleculen die door samenwerken allerlei biologische structuren kunnen opbouwen. Tijdens het samenwerken veranderen de eiwitten vaak van vorm. De onderzoekers gaan met nieuwe krachtige simulaties dit onbekende proces uitzoeken. Dit zal bijvoorbeeld leiden tot beter begrip van ziekten als Alzheimer en Parkinson, maar ook tot de ontwik-

keling van nieuwe duurzame materialen.

Geïntegreerde quantum foton technologie

Andrea Fiore, TU/e - Technische Natuurkunde

Bankgegevens kunnen intrinsiek veilig via internet worden verzonden door de individuele bits te coderen als een quantumtoestand van één enkel foton. In dit project worden miniatuur optische schakelingen ontwikkeld die één enkel foton kunnen genereren, manipuleren en detecteren.

Grensoverschrijdende elektronische interacties - Hans Hilgenkamp, UT - Fysica van Gecondenseerde Materie

In Mott materialen bestaan sterke onderlinge interacties tussen de mobiele ladingsdragers. In dit onderzoek wordt gekeken naar de elektronische wisselwerkingen aan grensvlakken tussen p- en n-type gedoteerde Mott materialen. Mogelijk treedt er een Bose Einstein Condensatie van excitonen op, met bijzondere uitwerkingen op de geleidingseigenschappen van het samengestelde systeem.

Bewegende nanostructuren - Jurriaan Huskens, UT - MESA+

Beweging is een elementaire eigenschap van moleculen en nanodeeltjes. De onderzoekers zullen de beweging van moleculen en nanostructuren op oppervlakken gaan sturen met behulp van gradiënten. Gradiënten zijn geleidelijk aan veranderende eigenschappen van het oppervlak in een bepaalde richting. Door middel van het controleren van die eigenschappen in tijd en plaats kan ook de beweging van erop geabsorbeerde moleculen en deeltjes gestuurd worden.

Zoeken naar supersymmetrie - Paul de Jong, Nikhef - Deeltjesfysica

De theorie van supersymmetrie voor-spelt een verband tussen elementaire deeltjes met heeltallige spin (bosonen), en deeltjes met halftallige spin (fermionen). In dit onderzoek gaan we de nieuwe LHC-versneller gebruiken om naar supersymmetrie te zoeken, en naar antwoorden op vragen als 'wat is donkere materie?' en 'waarom is er

geen antimaterie in het heelal?'.

Botsen zwarte gaten - Simon Portegies Zwart, UvA - Sterrenkunde & Informatica

In het midden van bijna ieder sterrenstelsel zit een zwart gat dat meer dan een miljoen keer zwaarder is dan de zon. Wanneer twee sterrenstelsels met elkaar in botsing komen, zullen de beide zwarte gaten ook op elkaar botsen, of toch niet?

Het ontrafelen van de mysteries van zwarte gaten - Kostas Skenderis, UvA - Instituut voor Theoretische Fysica

De zwaartekracht rond zwarte gaten is zo sterk dat niets eruit kan ontsnappen, maar volgens de kwantummechanica zenden zwarte gaten thermische straling uit. Het doel van dit project is om de kwantummysteries van zwarte gaten te verklaren met behulp van de snaartheorie.

Doelgerichte bewegingen laten zien hoe we zien - Jeroen Smeets, VU - Bewegingswetenschappen

Wij kunnen zonder problemen in één keer een glas oppakken zonder het om te stoten. Toch kunnen we niet zeggen waar het glas precies staat. Met uitgekiende gedragsexperimenten en wiskundige modellen proberen de onderzoekers erachter te komen hoe we dit klaar spelen.

Natuurkunde in de cellulaire energiefabriek - Gijs Wuite, VU - Fysica van Complexe Systemen

Cellen bevatten energieproducerende organen die hun eigen DNA bezitten alsof het kleine organismen zijn. Moleculaire machines die dit DNA continu bewerken, kunnen in een reageerbuisje nagebouwd worden. In dit onderzoek gaan we met natuurkundige instrumentatie en methoden het functioneren van deze moleculaire mechanismen uitzoeken.

De langdurige wedijver tussen lens- en spiegeltelescopen

Eric Kirchner beschreef eerder in het NTvN de ontstaansgeschiedenis van de telescoop tot aan 1608 [1]. De ontwikkelingen daarna werden gedominated door de beperkingen bij de productie van goede spiegels en lenzen.

Alexander Vermeulen

De 17^e en 18^e eeuw

Isaac Newton was in 1669 de eerste die een goede telescoop fabriceerde gebaseerd op spiegels in plaats van lenzen (zie figuur 1). Omdat de techniek van het verspiegelen van glas nog niet bestond, gebruikte hij als objectief een spiegel van een metaalmengsel van koper en tin. Dit mengsel kan goed gepolijst worden. De reflectie bleef helaas bij 60% steken. Daarbij kwam nog de verliesfactor door het benodigde vangspiegeltje in de lichtbundel, om het licht weg te kunnen spiegelen naar het oculair. Ondanks een verlies van meer dan 50%, koos Newton voor een spiegeltelescoop, omdat de spiegel geen kleurfout kent in tegenstelling tot lenzen. Met een spiegeltelescoop veroorzaakte William Herschel een sensatie in 1781 met zijn ontdekking van Uranus.

Alexander Vermeulen studeerde in 1965 af als natuurkundig ingenieur aan de TH Delft. Hij was daarna werkzaam bij de toenmalige optische industrie De Oude Delft.

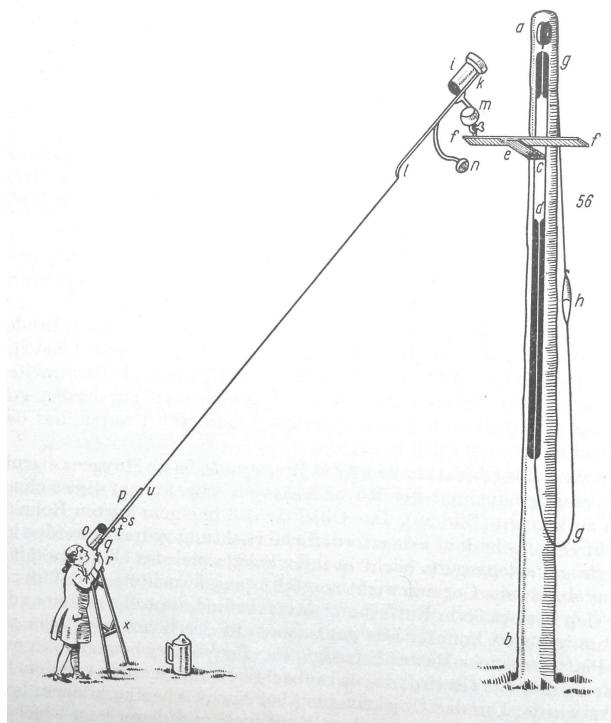
alexandervermeulen@versatel.nl

De kleurfout (chromatische aberratie) ontstaat doordat glas voor elke golflengte een verschillende brekingsindex heeft (dispersie). Hierdoor ontstaan de bekende regenboogachtige randjes rondom de contouren in het beeld. Christiaan Huygens minimaliseerde de kleurfout door de openingshoek klein te houden. Het nadelige effect van de dispersie blijft dan klein. Figuur 2 laat een indrukwekkende telescoop zien van Huygens. Zulke afmetingen zijn logischerwijs wel een nadeel. Huygens ontdekte wel met zijn telescoop in 1655 de ringen van Saturnus. Pas vanaf de tweede helft van de 18^e eeuw was er een betere oplossing: het achromatische doublet. Men wist dat flintglas (loodhoudend ‘kristalglas’, gebruikt voor wijnglazen en kroonluchters) een hogere dispersie heeft dan het gebruikelijke kroonglas. Men combineerde een lens van kroonglas met een zwakkere negatieve lens van flintglas. Een negatieve lens heeft een tegengestelde dispersie aan die van een positieve lens, waardoor de ongewenste gekleurde randen in het beeld een omgekeerde volgorde hebben. De lenstelescoop stond door de grotere lichtopbrengst voor in vergelijking met de spiegeltelescoop.

De eerste telescopen hadden een oculair met één (positieve) lens. Het gezichtsveld wordt bepaald door de hoekmaat van de objectivediameter, gezien vanaf het oculair, en was daar-



Figuur 1 Replica van Newton's telescoop uit 1670. Spiegeldiameter 15 cm, 40 maal vergroting.



Figuur 2 Buisloze ‘luchttelescoop’ van Huygens, ca 1650. Huygens paste voor het objectief brandpuntsafstanden tot wel 37 meter toe, dus nog veel langer dan hier afgebeeld. De lange brandpuntsafstand en de relatieve kleine objectivediameter waren in de tijd van Huygens de enige methode om bij lenzen het effect van de kleurfout klein te houden [2].

door klein. In 1665 vond de beroemde Engelse fysicus Robert Hooke de veldlens uit. Huygens verbeterde het oculair-ontwerp van Hooke (zie kader ‘De veldlenzen van Hooke en Huygens’).

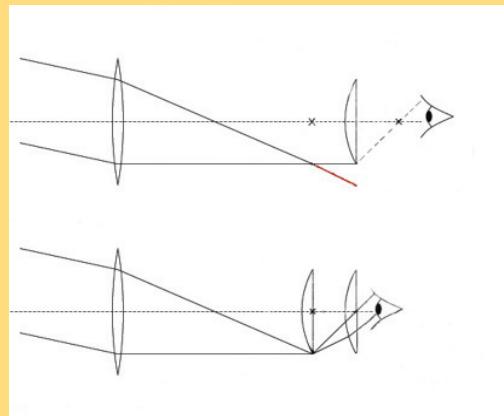
De 19^e eeuw

Hoewel de eerste achromatische doubletten al in de 18^e eeuw door de Engelsman John Dollond gemaakt werden, werden de problemen voor de vervaardiging van grote lenzen met hoge kwaliteit pas in de jaren 1820 goed aangepakt door Joseph Fraunhofer. Fraunhofer was de eerste die de brekingsindices en de dispersie van materialen zorgvuldig bepaalde, zodat hij met een theoretisch model de doubletten kon optimaliseren. Fraunhofer maakte lenstelescopen die nauwelijks onderdoen voor moderne lenstelescopen van vergelijkbare afmetingen (objectivediameter 15-20 centimeter). Friedrich Bessel boekte in 1838 een spectaculair resultaat met een ‘Fraunhofer’-telescoop. Hij toonde de sterrenparallax aan; de schijnbare beweging van nabije sterren ten opzichte van verder weg staande sterren door de baan van de aarde om de zon. Hoewel Fraunhofer zijn lenzen al

modelleerde, zou de wetenschappelijke basis voor geometrische optica gelegd worden door Ernst Abbe, die met Carl Zeiss werkte in de door Zeiss opgerichte industrie. Abbe vervolmaakte het doorrekenen van optische stelsels en wist op een systematische manier afbeeldingfouten buiten de optische as op te heffen. In 1835 werd een uitvinding gedaanwaardoorde spiegeltelescoop terugkwam. De chemicus Justus Liebig vond de oppervlakteverzilvering van glas uit en verhoogde de reflectiecoëf-

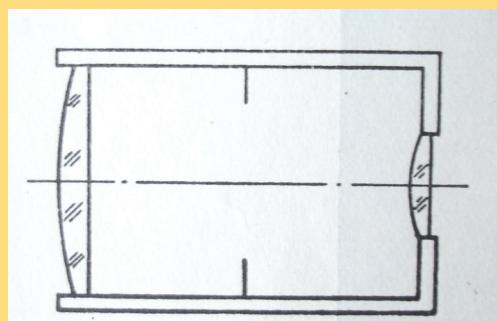
De veldlenzen van Hooke en Huygens

Hooke plaatste een extra lens (de veldlens) in het brandpunt van het objectief. Hierdoor heeft deze lens geen invloed op de totale vergroting. Maar het gezichtsveld neemt wel toe zoals blijkt uit onderstaande figuur.



Boven: zonder de veldlens valt de met rood aangegeven bundel juist buiten het gezichtsveld van de ooglens. Door Hooke’s veldlens (onder) blijft hij binnen het gezichtsveld.

Het Hooke-oculair lijdt aan een eigen kleurfout, die optreedt bij grote gezichtsvelden (25 tot 50 graden). Deze vergrotingskleurfout is dus verschillend van de chromatische aberratie in de tekst. De verbetering van Huygens is, dat hij de veldlens iets naar het objectief toe verschoof, en zodanig dimensioneerde, dat de brandpuntsafstand van de veldlens drie keer zo groot is als die van de ooglens. Huygens vond dat hij aldus, ook al had hij maar één glassoort ter beschikking, het oculair toch kon corrigeren voor de vergrotingskleurfout. Verder kon hij het oculair zo dimensioneren dat ook het astigmatische van het oculair verminderde. Astigmatische zorgt ervoor dat een punt afgebeeld wordt als een streepje.

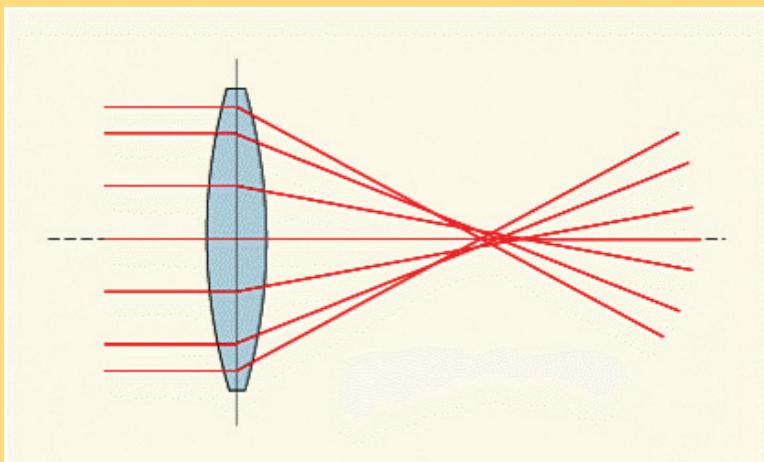


Het Huygens oculair. Links de veldlens, rechts de ooglens.

Afbeeldingsfouten van objectieven

Sferische aberratie of askring

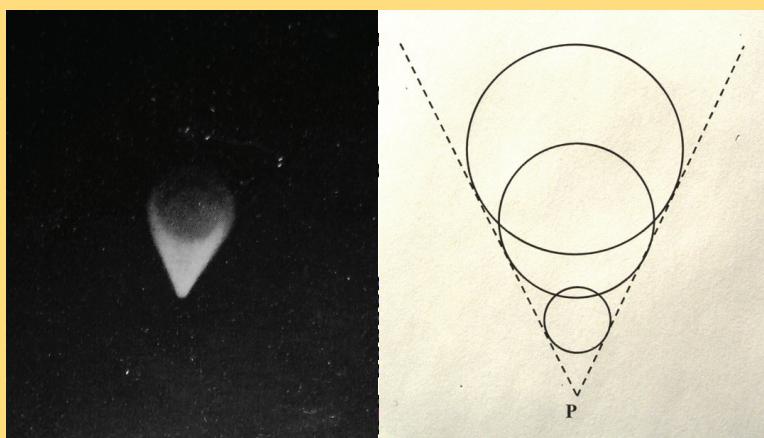
De figuur laat zien, dat de randstralen van de lens een kortere brandpuntsafstand hebben dan die van het centrale deel. Waar men het beeldvlak ook plaatst, de afbeelding is daardoor altijd een vlekje; terwijl de evenwijdig invallende bundel, bijvoorbeeld afkomstig van een ster, als een punt zou moeten worden afgebeeld. Een parabolisch spiegelobjectief heeft geen sferische aberratie.



Coma

46

Deze fout treedt op bij beeldpunten buiten de as van de spiegel of lens, ook in het geval van een parabolische spiegel. De as van het beeld bevindt zich onder de figuur. Het beeldpunt P, afgebeeld door het centrale deel van de spiegel, wordt scherp afgebeeld. Het cirkeltje boven P is afkomstig van de concentrische zone direct rondom het centrale deel van de spiegel. Deze zone heeft een iets grotere brandpuntsafstand. Het bijbehorende beeldpunt ligt daardoor iets achter het beeldvlak; de bundel snijdt het beeldvlak dus als een kringetje. En: bij de grotere brandpuntsafstand hoort ook een wat grotere afbeeldingsmaatstaaf. Daardoor ligt het centrum van het kringetje ook nog eens boven P. De linkerfiguur toont hoe een afbeelding van een ster er door coma vergroot uitziet.



ficiënt tot 98% (zie figuur 3). Dit geschiedde op basis van zilvernitraat, dat ook als 'knalzilver' bekend staat.

De eerste toepassing van dit proces was het verfraaien van kerstboomballen. De hoge reflectie bracht spiegels

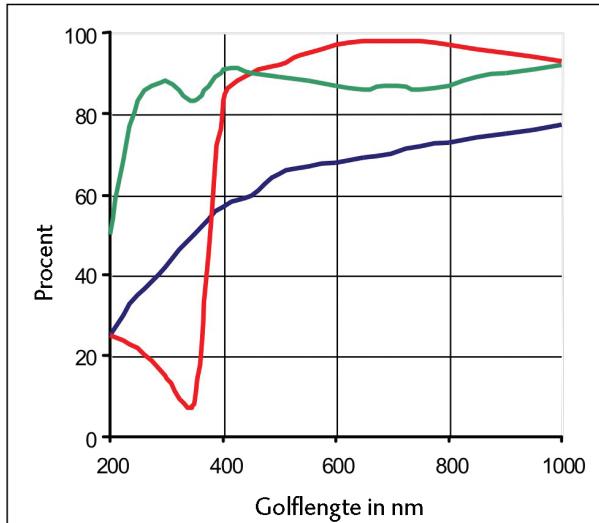
in het voordeel ten opzichte van het achromatische lenzendoublet (verliezen 20%). Veel later is zilver overigens vervangen door aluminium. In 1935 werd de grote 2,5 meter spiegel van de Mount Wilson telescoop in California van een aluminiumlaagje voorzien.

De eigenaren van telescopen keken wel eens bezorgd naar het oppervlak van hun lenzen, dat naar verloop van tijd dof werd. De oorzaak was aangetroffen onder invloed van de buitenlucht. Hoogwaardige glassoorten zijn hiervoor gevoeliger dan vensterglas. Een verminderde glans betekent minder reflectie. De conclusie, dat daardoor de transmissie van het objectief moest stijgen, werd merkwaardigerwijs pas veel later getrokken. Een extra voordeel van minder reflecties is een afname van strooilicht. Pas in 1935 zou een methode ontwikkeld worden om antireflexlagen te maken door het opdampen van dunne lagen in een vacuüm systeem (zie kader 'Anti-reflexlagen').

Geen winnaar

Optimale lenzen en spiegels waren nu mogelijk. Betere telescopen brachten een vergroting van de diameter van de lenzen en spiegels met zich mee, resulterend in meer lichtopbrengst en scherpere afbeeldingen. De volgende beperking werd de onrust in de atmosfeer, omdat met een grotere diameter ook de luchtkolom boven de spiegel (deze is nodig voor de beeldvorming) breder wordt. De oplossing voor dit probleem is een verplaatsing van de observatoria naar hoger gelegen plaatsen, op bergtoppen. De atmosfeer achter je laten is ook mogelijk, de Hubble telescoop (zie figuur 4) met een 2,5 meter spiegel is sinds 1990 een begrip geworden. Verdere vooruitgang zit nu in complexe processen als adaptieve optiek, waarbij het spiegeloppervlak voortdurend wordt aangepast om voor de onrust van de atmosfeer te corrigeren, en als interferometrie, waarbij de elektromagnetische signalen uit verschillende telescopen gecombineerd worden. Deze technieken hadden in de ogen van de helden uit de 17^e, 18^e en 19^e eeuw beslist als 'science fiction' geklonken.

Figuur 3 Reflectiecoëfficiënt van spiegelmaterialen. Blauw spiegelmetaal, rood zilverlaag, groen aluminiumlaag

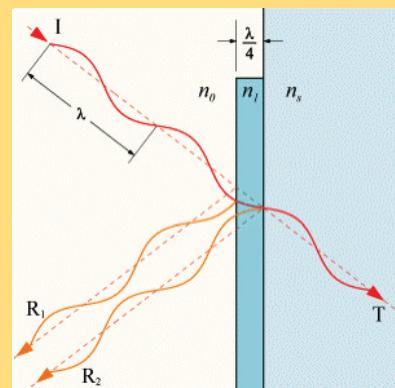


Referenties

- 1 E.Kirchner, NTvN, 74-10, blz. 356
- 2 Rolf Riekher, *Fernrohre und ihre Meister*, uitgave Volkseigener Betrieb Technik Berlin (DDR), (1957, herdrukt in 1992).
- 3 Met dank aan C.A.J. Simons voor de kaders 'De veldlenzen van Hooke en Huygens' en 'Afbeeldingsfouten van objectieven'.

Anti-reflexlagen

In 1935 patenteerde Alexander Smakula, een medewerker van Zeiss, een praktische methode om antireflexlagen te maken: opdampen in vacuüm. Hij werkte met laagjes van cryoliet (Na_3AlF_6), dat goed werkt, maar niet vochtbestendig en wrijfvast is. Voor anti-reflexlagen op glas wordt sinds 1938 magnesiumfluoride (MgF_2) gebruikt. MgF_2 is water- en wrijfvast. Hoogvacuüm is noodzakelijk bij opdampen omdat botsingen met gas het proces verstören. De druk moet daarom lager zijn dan 10^{-4} tot 10^{-5} mm Hg. Voor een anti-reflexlaag geldt, dat de optimale laagdikte een kwart golflengte is. Hieraan is natuurlijk maar voor één kleur te voldoen; hiervoor kiest men meestal 0,53 micron (groen). De figuur laat zien hoe de reflecties aan voor (R_1) en achterzijde (R_2) van de anti-reflex laag elkaar uitzetten.



Nieuws

Samenwerking Rusland en NL

Het Instituut voor Plasmafysica Rijnhuizen wordt deel van een nieuw samenwerkingsverband met vier Russische instituten, Het Centre of Excellence for Fusion Physics and Technology. Russische hoofdpartner is dr. Boris Kuteev van het Kurchatov-instituut in Moskou. Het nieuwe centrum onderzoekt de fundamentele natuurkunde van fusieplasma's rond onderzoeksreactor ITER, in het Zuid-Franse Cadarache.

FOM kent 16 miljoen euro toe aan 6 nieuwe onderzoeksprogramma's

De Stichting voor Fundamenteel Onderzoek der Materie (FOM) heeft in totaal 16 miljoen euro toegekend aan zes nieuwe onderzoeksprogramma's in de Nederlandse natuurkunde. Per programma bundelen dé specialisten van de verschillende Nederlandse kennisinstellingen op specifieke terreinen hun krachten. De leiders van de 6 nieuwe onderzoeksprogramma's zijn: Hans Hilgenkamp, Universiteit Twente, Theo Rasing, Radboud Uni-

versiteit Nijmegen, Marileen Dogterom, FOM-Instituut AMOLF, Alfons van Blaaderen, Universiteit Utrecht, GertJan van Heijst, Technische Universiteit Eindhoven en Albert Polman, FOM-Instituut AMOLF.

Meer informatie over de onderzoeksprogramma's is te vinden op www.fom.nl.

Dans der elektronen

Als natuurkundigen maken we graag onderscheid tussen ‘groot’ en ‘klein’. Grote dingen gedragen zich klassiek en kleine dingen quantummechanisch. Maar af en toe kunnen kleine zaken grote gevolgen hebben. Een voorbeeld hiervan is het Kondo effect. Sander Otte

Het Kondo effect kan ontstaan wanneer individuele magnetische atomen zijn opgelost in een metaal waar ze door geleidings-elektronen worden afgeschermd. Is de magnetisatie van het atoom ‘spin up’ dan zijn de elektronen er omheen gezamenlijk ‘spin down’ en andersom. Maar het wordt pas interessant wanneer het metaal wordt afgekoeld tot onder de Kondo temperatuur. Dan komt de atomaire spin in een superpositie toestand - een combinatie van up én down - en als gevolg daarvan vormt de hele elektronenwolk er omheen een soortgelijke onbepaalde toestand: tegelijkertijd down en up.

Hoe groot die elektronenwolk precies is weet niemand, maar één ding is zeker: er doen veel elektronen aan mee. Het Kondo effect is dus een collectief effect, een zorgvuldig gechoreografeerde, quantummechanische dans van de elektronen rondom het magnetische atoom. Eén enkel atoom kan zo een grote invloed hebben op de collectieve elektronische eigenschappen van een metaal: een macroscopisch quantumssysteem.

Deze macroscopische eigenschappen kwamen voor het eerst aan het licht in

de jaren ’30 van de vorige eeuw, in Leiden, tijdens geleidingsmetingen aan metalen bij lage temperatuur. Maar om de oorsprong van het effect goed te kunnen begrijpen moet je weten wat er gebeurt op de schaal van het centrale magnetische atoom. Toen het eind jaren ’90 mogelijk werd om experimenteel individuele ‘Kondo atomen’ te bestuderen leidde dit dan ook tot een herleving van het onderzoeksgebied [1].

Eén van de technieken die dit mogelijk maakte is de Scanning Tunneling Microscope (STM). Hierin tast een scherpe naald een oppervlak af zonder dit oppervlak zelf te verstoren. Door de naald vlak boven een magnetisch atoom te plaatsen dat op een metaaloppervlak ligt, kondent voor het eerst op gecontroleerde wijze elektronen rechtstreeks in het hart van een Kondo systeem worden geïnjecteerd - een prachtig experiment! Maar de techniek had één nadeel: doordat het atoom direct bovenop een metaal lag was het Kondo effect bijzonder sterk. Zo sterk zelfs, dat door de intense koppeling met de geleidingselektronen het individuele spinkarakter van het magnetisch atoom min of meer verloren gaat.

In een recent experiment [2] wordt daarom een ‘verzwakt’ Kondo systeem bestudeerd (zie figuur). Door een isolerende laag van één atoom dik aan te brengen tussen het metaaloppervlak en het magnetisch atoom, neemt de sterke van de koppeling met de geleidingselektronen aanzienlijk af. Als het atoom – in dit geval een kobalt atoom - nu door de STM naald wordt benaderd, kan een geleidingsspectrum zoals in de figuur worden gemeten

door de spanning op de naald ten opzichte van het oppervlak te variëren. De scherpe piek in de geleiding rond nul spanning is kenmerkend voor het Kondo effect: een bijzonder complexe, maar grotendeels begrepen resonantie die voortkomt uit het onbepaalde spinkarakter van de superpositie toestand. Maar wat dit spectrum zo speciaal maakt is de geleidingsstap rond 5 mV. Die stap markeert een excitatie van de spin op het atoom door interactie met de elektronen uit de naald. Bij lage spanning hebben de elektronen niet genoeg energie voor deze excitatie, maar vanaf een bepaalde waarde lukt het ze wél. Nu kunnen elektronen op twee manieren door het atoom stromen: mét excitatie of zonder. Dit opent een extra geleidingskanaal bovenop de gewone achtergrondstroom; vandaar de plotselinge toename in de geleiding.

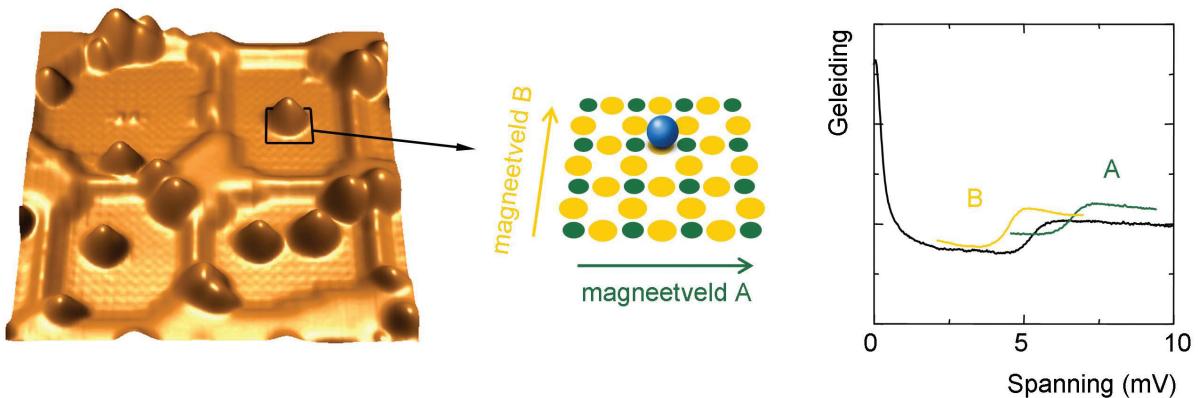
Van deze scherp gedefinieerde excitatie valt veel te leren. Allereerst is het atoom nu kennelijk voldoende ontkopeld om van één lokale spin te spreken; de isolatieterug heeft dus gewerkt. Daarnaast kunnen we concluderen dat deze spin een voorkeursoriëntatie heeft voor magnetisatie, anders viel er niks te exciteren. En bovendien weten we dat, wat die voorkeursoriëntatie ook is, het zo’n 5 meV kost (de energie die elektronen hebben bij een spanning van 5 mV) om de spin daar vandaan te draaien.

Maar dat is nog niet alles, want ook de oriëntatie zelf kunnen we vaststellen. Door sterke magneetvelden aan te leggen langs de verschillende kristalllassen van het oppervlak, verandert - afhankelijk van de sterke en richting van het magneetveld - de excitatie-energie, waardoor de stap verschuift.



Sander Otte is Post-doc aan het National Institute of Standards and Technology (NIST) in de Verenigde Staten. Hij promoveerde in Leiden en publiceerde verschillende artikelen over spin excitatie spectroscopie in samenwerking met het IBM Almaden Research Center.

aotte@nist.gov



Links: STM opname ($10 \text{ nm} \times 10 \text{ nm}$) van individuele kobalt atomen op eilandjes van isolerend kopernitride (één atoomlaag dik) bovenop een oppervlak van puur koper. Midden: Het kobalt atoom ligt zodanig op het kopernitride eiland dat het in de ene richting op een rij van koper (geel) én stikstof atomen (groen) ligt en in de andere richting alleen van koper atomen. Rechts: Metingen van de geleiding (eigenlijk differentiële geleiding) door het kobalt atoom. De gekleurde lijnen zijn gemeten bij magneetvelden van 7 Tesla langs de twee kristalllassen van kopernitride.

In die verschuivingen zit een hoop informatie. Neemt de energie bijvoorbeeld toe (zoals bij magneetveld 'A' in de figuur) dan weten we dat het magneetveld de excitatie moeilijker maakt. Dit betekent dat het magneetveld op dat moment in dezelfde richting staat als de spin waardoor het nog moeilijker wordt om deze weg te draaien. Neemt de energie echter af ('B' in de figuur) dan staat het magneetveld kennelijk loodrecht op de spin. In dat geval kan de spin, die graag naar het magneetveld toe wil draaien, juist makkelijker worden geëxciteerd.

De waarneming van die ene stap biedt dus een unieke kans om een Kondo systeem tot in het fijnste detail te bestuderen. We weten nu langs welke

richting de centrale spin zich oriënteert en wat er voor nodig is om dit te veranderen. En hierin blijkt nu juist het geheim van het Kondo effect te zitten. Door het experiment te herhalen op verschillende magnetische atomen – sommige mét Kondo effect en sommige zonder – werd duidelijk dat de spinoriëntatie bepalend is voor de vraag of dit collectieve fenomeen kan plaatsvinden of niet. Alleen als de spin zodanig 'los' ligt dat één geleidingsatoom het kan omschoppen van up naar down is Kondo afscherming mogelijk.

En zo wordt de mysterieuze dans der elektronen ineens een stuk inzichtelijker. Is daarmee het Kondo probleem voorgoed opgelost? Dat helaas nog

niet: er zijn nog altijd veel raadsels rondom het collectieve gedrag van de elektronen. Niet voor niets wordt het Kondo effect dan ook een 'veel deeltjes' probleem genoemd; een categorie problemen die berucht is om hun complexiteit. Maar de mogelijkheid om uit dit complexe systeem één specifiek deeltje – namelijk het atoom in het midden - te belichten en daarvan het magnetisme te doorgronden is een enorme stap in de goede richting.

Referenties

1. L. Kouwenhoven & L. Glazman, *Physics World* 14, 33 (2001)
2. A. F. Otte et al., *Nature Physics* 4, 847 (2008)

Posterwedstrijd op Fysica 2009



Promovendi en andere fysici zonder een vaste aanstelling worden van harte uitgenodigd deel te nemen aan de Posterwedstrijd tijdens FYSICA 2009 op 24 april te Groningen. Voor de beste 3 posters is een mooie prijs beschikbaar: deelnemers maken kans op prijzen van € 500, € 300 en € 200 voor respectievelijk de

eerste, tweede en derde prijs. Een jury zal tijdens FYSICA de uiteindelijke winnaar bepalen en bekend maken, de prijzen zullen op FYSICA 2009 worden uitgereikt. The European Physical Journal (Springer Verlag) is sponsor van deze posterwedstrijd. De competitie staat open voor fysici van alle nationaliteiten.

Deelnemers kunnen zich aanmelden via www.fysica.nl, waar ook meer informatie te vinden is. Aanmelden kan tot en met 24 maart 2009.

Einstein vergat wel eens een minnetje

Nu lijkt het vanzelfsprekend. Albert Einstein bedacht de relativiteitstheorie en werd beroemd. Historici Anne Kox en Michel Janssen brengen in beeld hoe dit nu eigenlijk ging. "Op spreekbeurten laat ik vaak zien dat Einstein ook domme rekenfouten maakte. Voor veel mensen is dat bemoeidigend." ScienceGuide sprak hen op het jaarlijkse congres van historici van de quantumfysica, dit jaar in Utrecht. Jonathan Zondag

50

UvA-hoogleraar Anne Kox werkt al 23 jaar mee aan de uitgave van het complete oeuvre van Einstein (Einstein Papers, uitgegeven door California Institute of Technology). "Fascinerend is de enorme snelheid waarmee hij nieuwe wegen inslaat en langs andere wegen begint te denken. Je ziet voortdurend heel nieuwe dingen tevoorschijn komen." Michel Janssen doceert geschiedenis van de quantumfysica aan de University of Minnesota en was ook bij het project betrokken.

Het belang van vergissingen

Janssen: "We moeten wegkomen van

het idee van Werner Heisenberg en Erwin Schrödinger als onfeilbaar. In hun werk sloegen ze vaak de verkeerde kant op, voordat ze op het punt kwamen waardoor ze beroemd werden. Detours en vergissingen zijn dus heel belangrijk.

In voordrachten laat ik graag documenten zien waarin Einstein heel domme fouten maakt. Hij vergat wel eens een minnetje of een factor twee. Als je 'weet' wat de uitkomst moet zijn, ga je vaak onbewust fouten maken. Einstein overkwam dat net zo goed als ieder ander. Als ik dat aan groepen vertel, zeggen mensen vaak dat ze dat heel bemoeidigend vinden.

Ik ben in mijn opzet geslaagd als mensen door mijn opzet interesse ontwikkelen in de geschiedenis van een vakgebied. Ik hoop dat ze ook oog krijgen voor de populaire literatuur, hoop ook op een realistischer beeld over hoe vakgebied zich ontwikkelt. In historische inleidingen staan vaak enorme ver-

vormingen van wat heeft plaatsgevonden. Het is ook interessant om te zien hoe misvattingen ontstaan.

U bestudeert het vakgebied geschiedenis van de quantummechanica. Hoe is dat vakgebied ontstaan?

Janssen: "Een van de meest invloedrijke boeken, van Max Jammer, is uit de 2e helft van de jaren zestig. Het boek is geschreven op initiatief van de American Physical Society. Het was kort nadat vooraanstaande quantumpsicici als Pauli en Kramers gestorven waren. Onder meer John van Vleck nam toen het initiatief dat prominente onderzoekers uit de quantumfysica geïnterviewd zouden moeten worden voordat ze doodgingen. Het Archive for the History of Quantum Physics is toen opgezet. Als directeur trok Van Vleck zijn oud-promovendus Thomas Kuhn aan, die toen net klaar was met zijn inmiddels beroemde boek over paradigmawisselingen. Op basis van veel interviews heeft Max Jammer toen het boek *The Conceptual Development of Quantum Mechanics* geschreven. Daarna zijn er veel meer gespecialiseerde artikelen verschenen. In de jaren negentig stortte het vakgebied merkwaardig genoeg een beetje in. Ik ben betrokken bij een project van het Max Planck Instituut voor Wetenschapsgeschiedenis in Berlijn om dat weer nieuw leven in te blazen".



Michel Janssen.

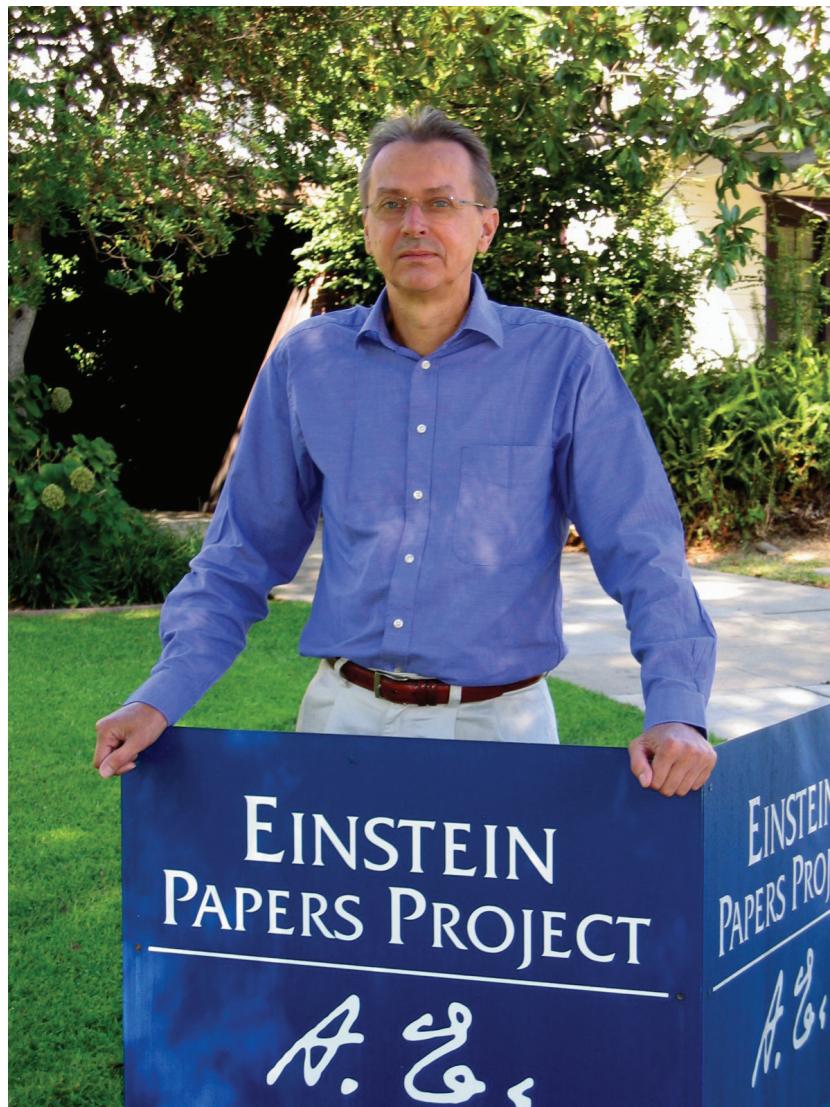
Anne Kox, u werkt al meer dan 20 jaar aan de Einstein Papers. Wat vertelt u uw studenten over Einstein?

“Als ik met mijn studenten Einstein lees, probeer ik ze te laten zien dat de oppervlakkige versie van het ontstaan van de relativiteitstheorie niet klopt. In die versie is de spanning eraf. Lees je de stukken van Einstein, dan zie je dat hij zichzelf steeds fundamentele vragen stelde. Fascinerend is de enorme snelheid waarmee hij nieuwe wegen inslaat en langs andere wegen begint te denken. Je ziet voortdurend nieuwe dingen tevoorschijn komen. Steeds probeert hij opnieuw te beginnen: laten we dat proberen eens te pakken en daar op een andere manier naar kijken. Zo toont hij aan dat licht op bepaalde momenten ook als gelocaliseerd kan worden gezien, in die tijd een revolutionaire gedachte. Dat past hij toe op een aantal niet begrepen experimenten. Dit alles is voor studenten een eye-opener. Dat is leuk aan lesgeven aan studenten natuurkunde die een aantal van die theorieën wel gehad hebben, maar dan pas zien hoe die theorieën een plek krijgen in het geheel van de natuurkunde. Het is verbazingwekkend te zien waar die theorieën vandaan komen. Je kunt er fabeltjes mee ontmaskeren.

Ik kreeg een beter begrip van de algemene relativiteitstheorie toen ik Einstein had gelezen. Dan zie je veel beter de onderliggende filosofie. Zie je de fasen uit het verleden, dan ga je beter begrijpen dat wat nu state of the art is, een fase is die weer verlaten wordt. Ik lach mensen dan ook hartelijk uit als ze zeggen dat ze de Theorie van Alles hebben. Het is nuttig voor studenten zich te realiseren, dat er 100 jaar geleden enorm gestreden en nagedacht werd over begrippen die nu als vanzelfsprekend worden ervaren. Er was bijvoorbeeld een lange ontwikkeling voor nodig, voordat het Zeeman-effect eenmaal bekend stond als het Zeeman-effect”.

De ware troost

“De meeste fysici hebben een oppervlakkig beeld van Einstein. Maar hij was een mens van vlees en bloed met tekortkomingen. Hij was niet altijd een even goede vader van zijn kinderen en zeker niet altijd een goede echtgenoot. Einstein is zijn hele leven een



Anne Kox.

loner geweest in intermenselijke relaties. Niet dat hij geen vrienden had. Hij was geen autist of iemand met Asperger zoals vaak gezegd wordt, maar hij had zijn prioriteiten. Als hij aan het werk wilde, ging hij aan het werk en trok hij zich van niets en niemand iets aan.

Hij beklaagde zich over innerlijke eenzaamheid, maar dat had te maken met zijn focus op de wetenschap. Zeker als theoreticus ben je toch eigenlijk meestal in je eentje bezig. Het is dan tussen jou en de natuur. Daar kan ook niemand tussen komen. Dat gold ook voor Einstein. Na een verbroken verloving schrijft hij: “De ware troost vind ik in de wetenschap en dat zal mijn hele leven zo blijven”.

Ook speelde hij vanaf de Eerste Wereldoorlog een maatschappelijke rol, waarbij hij een ragfin gevuld had voor de juiste keuzes. Hij bekommerde zich om de mensen die te lijden hadden onder de oorlog. Hij spande zich in voor

Joden die uit Oost-Europa kwamen en een marginal bestaan leidden. Hij zette zich enorm in voor het stichten van een Joodse staat in Palestina. Zo toert hij begin jaren twintig een half jaar rond in de VS en elders, tot en met China, om geld in te zamelen. Hij weet dat hij een icoon is en dat hij dus veel geld kan ophalen”.

En hij zag dat het niet goed was

“Einstein was ook moedig. Aan het begin van de Eerste Wereldoorlog schaarde bijna de hele wetenschappelijke gemeenschap zich in een manifest achter het Duitse leger. Einstein distantieerde zich daar nadrukkelijk van, omdat hij het als een puur nationalistisch manifest beschouwde. Het was heel pijnlijk, want een van zijn naaste collega's - Max Planck - ondersteunde het manifest wel. Einstein zag gelijk, dat dat niet goed was. Hij had het inzicht om zich daaraan te onttrekken.



Albert Einsteins Schweizer Pass, 1923 (foto: Historisches Museum Bern).

Einstein bleef wel bevriend met Planck. Toen Einstein in de jaren onder druk kwam te staan vanwege antisemitische campagnes, verpakt als anti-relativiteitscampagnes, heeft hij overwogen weg te gaan. Hoewel er in Nederland een leerstoel voor hem klaarstond, heeft hij die toch niet geaccepteerd: "Dat kan ik Planck niet aandoen", schrijft hij letterlijk.

Na de Eerste Wereldoorlog is Einstein actief geweest in allerlei pacifistische bewegingen. Aangezien Duitsland de oorlog had verloren, lag antisemitisme op de loer. Einstein had goede contacten met kranten die als Joods bekend stonden. Het pacifisme werd daarom wel als een Joods complot gezien. Als je dat soort teksten nu leest, dan word je daar niet blij van.

Er is lang verzet geweest tegen de algemene relativiteitstheorie. Dat had ermee te maken, dat Einstein met een geheel nieuwe visie kwam op ruimte en tijd. Vooral van buiten de universitaire wereld kwam er verzet. Ook in het Nederlandse literaire tijdschrift De Gids woedde een discussie daarover. Mensen zeiden dingen als: "Gelijk-tijdigheid is niet relatief, dat zie je toch".

Einstein heeft geen Nobelprijs gekregen voor zijn relativiteitstheorie. Dat is heel raar, want in de gemeenschap van natuurkundigen was de relativiteitstheorie echt wel aanvaard als revolutionair. Maar de Zweedse commissie was conservatief en heeft daarom iets anders gevonden zijn bijdrage aan de theoretische fysica, in bijzonder de ontdekking van het foto-electrisch ef-

fekt [1]. De aanleiding voor zijn prijs in 1921 was dus een afgeleide".

Nederland en Einstein

In de geschiedenis van de quantumfysica heeft Nederland een voorname rol gespeeld, met name in het eerste kwart van de twintigste eeuw. De beroemdste Nederlandse natuurkundigen uit die tijd is ongetwijfeld Hendrik Antoon Lorentz. "Einstein had heel veel respect voor Lorentz", weet Anne Kox.

Nederland moet iets goeds hebben gedaan...?

Kox: "Het canonieke verhaal is dat Nederland vanuit een obscure positie door twee dingen belangrijk werd. Ten eerste door de universitaire hervervorming van de universiteiten van 1877. Terwijl universiteiten tot dan toe vooral onderwijsinstellingen waren geweest waar ook onderzoek plaatsvond, kregen ze nu een onderzoeksstaak. Dit leidde tot een vergroting van het aantal leerstoelen en tot aanzienlijke onderzoeksbudgetten, met name in de natuurkunde.

Ten tweede door de oprichting van de hbs in 1862. Het gymnasium leidde wel op voor een universitaire studie, maar was tamelijk elitair. De middensklasse ging er niet makkelijk heen, ook omdat het specifiek opleidde voor de universiteit. Johan Rudolf Thorbecke, Minister van Binnenlandse Zaken in die tijd, zette daar de hogere burgerschool naast omdat er behoefte was aan een middenkader in het be-

drijfsleven en bij de overheid. Hij heeft bij de opzet van de hbs goed gekeken naar wat er in andere landen gebeurde. Zodoende kreeg de hbs een heel modern curriculum. Mensen leerden er hun talen spreken. Dit in tegenstelling tot de gymnasia, waar de nadruk lag op passieve taalbeheersing. Ook was er bijzondere aandacht voor de natuurwetenschappen. Er waren bijvoorbeeld practica.

De hbs leidde niet op voor de universiteit. Het gekke was dat heel veel hbs'ers in de praktijk toch aan de universiteit gingen studeren, met name in de exacte vakken. Je moest dan wel staatsexamen Grieks en Latijn doen. Dat kostte vaak een jaar. Maar een heleboel studenten hadden dat ervoor over. Hierdoor kwam er instroom in de universiteit vanuit een heel nieuwe groep. Zo ontstond er een heel nieuw areaal aan talent.

De meeste grote wetenschappers in de natuurkunde tot aan de Eerste Wereldoorlog kwamen van de hbs. Lorentz was een hbs'er, Pieter Zeeman was een hbs'er. Er was een clustering van talent, denk ook aan Anton Korteweg en zijn leerling Niek Brouwer. Na de jaren dertig verloor Nederland zijn positie weer. Het onderwijs was nog steeds even goed, maar we hadden niet meer dezelfde clustering van talent".

Tweede Gouden Eeuw

Het proefschrift van Bastiaan Willink uit 1980 over Nederland en de Nobelprijzen voor 1870-1940 heet om die reden De tweede Gouden Eeuw. Willink heeft aangetoond dat Nederland een opleving had in het vierde kwart van de 19e eeuw. Dat kun je koppelen aan allerlei uitspraken van tijdgenoten. Er waren buitenlanders die ook zeiden dat Nederland een grootmacht was geworden op het gebied van de fysica. Lorentz was in de fysica van die tijd de leidende figuur. Eerst werkte hij samen met zijn leermeester Johannes Diderik Van der Waals, die focuste op thermodynamica. Lorentz was veel breder. Lorentz heeft grote invloed gehad op het denken over electromagnetisme, het denken over zaken als veld, lading etc.

Einstein keek enorm op tegen Lorentz en had bewondering voor wat Lorentz voor elkaar had gekregen. Ook hoe Lorentz in no time de algemene relativiteitstheorie van Einstein heeft opge-

pakt en er verder aan is gaan werken. Einstein is op dat moment al 62. In de natuurkunde is het niet gebruikelijk, dat mensen op latere leeftijd nog baanbrekend onderzoek verrichten. Ook heeft hij nog een belangrijke discussie in gang gezet met Schrödinger. Toen was hij al bijna 73!"

Noot

- ¹ Dit artikel is een licht bewerkte versie van een interview dat eerder verscheen op ScienceGuide.nl.

Referentie

- ¹ http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1921/index.html

Jonathan Zondag studeerde theologie in Utrecht, Princeton en Birmingham. Hij was voorzitter van het ISO (Interstedelijk Studenten Overleg). Sinds 2005 werkt hij als redacteur voor ScienceGuide.nl, online magazine voor de kennissector.



jzondag@scienceguide.nl

Column



Grenzen aan persoonsgebonden steun?

Mijn inschatting over goed onderzoek en goede onderzoekers is al heel lang dezelfde. Ingrediënten zijn een hoge snelheid en originaliteit van denken, grote doortastendheid bij het implementeren van ideeën, en diepgang en handigheid bij het presenteren van het onderzoek. De zojuist genoemde aspecten maken het makkelijker onderzoekers in te schatten in de nabijheid dan diegenen die inhoudelijk verder weg staan. Bewondering voor onderzoek van anderen is mooi en het herkennen van talentvolle onderzoekers is mooi, omdat de natuurkunde, die zij blootleggen, fascinerend is. Soms maak ik deel uit van een gezelschap dat ‘bewondering’ moet omzetten in toekomstperspectieven voor onderzoekers. Het voorbeeld is de NWO vernieuwingsimpuls. Dit beleidsinstrument groeit in volume en geeft stempels van kwaliteit op onderzoek en ideeën van onderzoekers.

In persoonsgebonden steun ligt het risico op de loer dat ‘goed zijn’ neerkomt op ‘goed gevonden worden’. Ik ga hier niet beweren dat deze elkaar uitsluiten, integendeel. Maar de aandacht voor ‘goed gevonden wor-

den’ heeft consequenties, die wij niet (moeten) willen. Goed gevonden worden kost namelijk heel veel energie en niet-productieve tijd van potentiële kandidaten. Erger nog, nu de belangen groeien, gaat een steeds uitgebreidere omgeving zich inzetten om het ‘goed gevonden worden’ te optimaliseren voor lokale redenen. Teksten worden herschreven, presentaties geoefend, netwerken worden ingezet. Daarnaast treedt er verenging op, eerdere prijswinnaars hebben een voordeel. Zij zijn immers ooit goed gevonden, een geruststelling voor altijd onzekere beoordelaars met een beperkte tijd om inschattingen te maken.

Noordam [1] concludeerde al in 2005 in zijn inaugurele rede, dat de vernieuwingsimpuls het personeelsbeleid van de universitaire docenten en hoofddocenten ging bepalen, en dat, mede hierdoor, universiteiten de grip op hun eigen onderzoeksprogramma kwijt raken. Ik deel zijn mening dat dit ongewenste bijwerkingen zijn van een in aanleg goed programma. De recente verruiming van de regels kan tot gevolg hebben dat ook hoogleraren in de toekomst jong en VICI-waardig moeten zijn op bevel van armlastige

decanen.

Mijn voorstel is om meer dan nu weer eens vertrouwen (en de financiële middelen) te leggen bij de universitaire onderzoeksinstututen zelf. Deze zijn langzamerhand ruimschoots overtuigd dat goed zijn belangrijk is bij het aannemen van de volgende generatie wetenschappers. Dit zal universiteiten in staat stellen om meer dan nu een eigen origineel onderzoeksbeleid te realiseren. Dat we verantwoording moeten afleggen voor gemeenschapsgeld en dat de noden van de maatschappij daarin een rol spelen is ons allang duidelijk.

Ook in een dergelijk systeem bewonderen we de kwaliteit van collega’s en zeggen we tegen elkaar: “wat is die goed, zeg”, onafhankelijk van de hoeveelheid persoonsgebonden steun.

Wim van der Zande

Referentie

- ¹ *Hora est. Het is tijd om promotieonderwijs en promotieonderzoek te organiseren*, inaugurele rede L.D. Noordam, UvA (2005), <http://www.hetpnn.nl/wordpress/wp-content/uploads/2006/10/oratie-bart-noordam.pdf>.

Natuurkunde en innovatie bij het energieverbruik van de automotor (1)

Lo Bour poneert als columnist in NTvN 75-1 onder andere dat een manier om voor een verbrandingsmotor tot en hoger rendement te komen, uitgaan kan worden van het Stirling principe. Ik mis enige fysische onderbouwing van deze stelling terwijl juist de vergelijking van verbrandingsmotoren (Diesel dan wel Otto maakt in dit verband niet veel uit) met de Stirling motor zich bij uitstek eigenet om er fysische beschouwingen op los te laten.

Waaraan dankt de motor met inwendige verbranding zijn rendement en waaraan dankt de Stirling motor dit? Verder wil ik een paar kanttekeningen maken bij het artikel. Er wordt van de hybride auto het zwakke punt genoemd van de zware (lood) accu. Dit is onjuist tenminste voor wat betreft de Toyota Prius die als ik me niet vergis is uitgerust met Lithium Metaalhydride accus's hoe de levensduur hiervan in de praktijk zal uitvallen en wat de vervangingskosten en milieu-implicaties hiervan het gevolg zijn is een ander verhaal. Een bijkomend voordeel van de hybride oplossing van Toyota is dat de electro mechanische aandrijving neerkomt op een CVT waardoor de motor in een redelijk constant toeren regime kan worden gehouden wat de optimalisatie van rendement en emissie doelstellingen door toepassing van variabele kleptiming mogelijk heeft

gemakkt. De Toyota Prius is natuurlijk niet te zien als oplossing van het energieprobleem maar is toch tenminste een interessante tussenstap naar toekomstige voertuig tractiesystemen zoals brandstofcellen. Tenslotte slaat Lo Bour de plank geheel mis waar hij vervanging van de gebruikelijke kleppen van de verbrandingsmotor voorstelt door roterende kleppen en de gebruikelijke "mushroom" klep afdoet als citroenstampers. Als enige argument noemt hij dat deze veel energie vragen en relatief grote wrijving hebben. Ik ken het genoemde alternatief niet maar denk dat roterende kleppen onder de heersende gasdrukken dwars op de draairichting veel hogere wrijving zullen ondervinden. Indien de gasdruk niet dwars op de draairichting is zal het probleem eerder liggen in de afdichting zoals dit destijs bij de schuivenmotoren het geval was. Dit waren overigens wel motoren met een voor die tijd zeer hoog rendement. Dit werd mogelijk gemaakt door de vrijheid de vorm van de verbrandingsruimte optimaal dat wil zeggen bolvormig te construeren zonder de hot spots van kleppen. Hierdoor konden deze motoren een aanzienlijk hogere compressieverhouding hebben zonder dat dit door detonatie werd begrensd. Een moment later valt Lo Bour voor een principe van de Revtec motor waarbij



De Toyota Prius, een hybride auto.

ik de indruk krijg dat de zojuist bij de kleppen zo vermaledijde nokken hier bij de krukas weer worden binnen gehaald. Als ik de foto goed bekijk zie ik een "krukas" met een driekantige nok die rollen op een zuigerjuk beweegt. Het argument dat een standaard krukas een mechanisch energieverlies zou hebben van circa 35% snijdt zeker geen hout. Een dergelijke vermogens dissipatie zou ieder lager en de krukas zelf binnen de kortste keren doen smelten. Ervaringen uit de motortechniek wijzen het aandeel van smeeralolie warmte in de warmtebalans aan op 5 tot 10 % van het totaal dit is afhankelijk van motortype en afmetingen. Het merendeel hiervan is warmte afgifte als gevolg van de zuigerkoeling.

Ik hoop hiermee wat fysische achtergronden te hebben toegevoegd aan de discussie waarheen de ontwikkeling van de motoren voor voertuigtractie zullen leiden.

Arnoud Carp

Natuurkunde en innovatie bij het energieverbruik van de automotor (2)

In NTvN 75-1 redeneert Lo Bour in zijn column "Natuurkunde en innovatie bij het energieverbruik van de automotor" dat hybride auto's het predikaat duurzaam niet verdienen. Hierbij gebruikt de heer Bour een aantal argumenten die feitelijk onjuist zijn.

De heer Bour schrijft dat lood(zuur) accu's worden gebruikt in hybride auto's. De huidige commercieel verkrijgbare hybride auto's gebruiken echter geen lood maar nikkel-metaalhydride (NiMH) batterijen. Deze zijn aanzien-

lijk minder belastend voor het milieu dan loodaccu's.

De heer Bour merkt terecht op dat de hybride drive-train (elektromotor, batterijen) het gewicht en daarmee de benodigde kinetische energie van de auto verhoogt. Hij gaat hier echter voorbij aan de grote kracht van de hybride auto, namelijk het regenereren van de remenergie. De elektromotor wordt in dat geval gebruikt om de auto te remmen door te fungeren als een generator. De geproduceerde elek-

triciteit wordt tijdelijk opgeslagen in de batterij om bij het optrekken weer gebruikt te worden. Hierdoor gaat slechts een minimale hoeveelheid kinetische energie verloren.

Ook vermeldt hij niet dat de hybride auto door gebruik te maken van het grote verschil in efficiency van een brandstofmotor bij laag (5%) en hoog vermogen (30%) in staat is de motor voornamelijk te laten draaien bij hoog vermogen en daardoor een grote winst boekt.

Verder schrijft de heer Bour dat de batterij levensduur van "slechts" 8 jaar kort is en dat de auto hierdoor een dure aangelegenheid is. Deze 8 jaar is de garantieperiode die de autofabrikant geeft op de batterij, niet de werkelijke levensduur en dit moet gezien worden in het licht van de gewoonlijk

5-jarige afschrijvingstermijn van een auto. Meerdere fabrikanten, waaronder Toyota en Honda, hebben aangegeven dat de batterij is ontworpen om tenminste net zo lang als de levensduur van het voertuig mee te gaan. De hybride auto is daarom zuiniger en milieuvriendelijker dan zijn niet-

hybride tegenhangers. Nog beter is een hybride auto die op andere vlakken ook energieuwig is, zoals de heer Bour terecht concludeert in zijn column.

Bart Roossien

Natuurkunde en innovatie bij het energieverbruik van de automotor (3)

Al eerder heb ik een Amerikaans artikel onder ogen gekregen waarin werd gesteld dat de hybride auto over de gehele levensduur gerekend geen milieuwinst oplevert vanwege de vervuiling bij opbouw en afbraak. Ik had sympathie voor de argumenten, maar aangezien een en ander niet echt hard

gemaakt werd rees bij mij natuurlijk de vraag wat de relatie was tussen industrie en schrijver. Ik kon dat niet achterhalen, maar nu liggen de kaarten wat eenvoudiger. Kan Lo Bour mij daarom uitleggen waarom na acht jaar het vervangen van de accu in een hybride auto evenveel kost als een geheel

nieuwe auto? Dit was een hard statement van zijn kant en ik heb tegenover vrienden die mij gewoon uitlachten het standpunt ingenomen dat een dergelijke bewering in een gerespecteerd tijdschrift als het NTvN niet zonder grond wordt gedaan.

Henk Boddendijk.

Natuurkunde en innovatie bij het energieverbruik van de automotor (4)

Wat betreft de voor en nadelen van een Stirling motor ten opzichte van een Otto motor of een diesel motor valt veel meer te zeggen dan in het bestek van een column mogelijk is. Voor veel vragen over de Stirling motor en de mogelijkheden voor rendementsverbetering zou ik willen verwijzen naar de site van The American Stirling Company (<http://www.stirlingengine.com>). Twijfels zijn er over mijn bewering dat hybride auto's niet voldoende duurzaam zouden zijn. Arnoud Carp en Bart Roossien hebben gelijk dat de accu's in hybride auto's geen lood gebruiken. Een slordigheid van mijn

kant. De accu maakt gebruik van nikkelmetaalhydride, echter, nog steeds niet een erg milieuvriendelijke stof. Kosten van vervanging en de levensduur worden naar mijn idee door de fabrikant geflatteerd. Vervanging is nodig rond de 150.000 km en alhoewel de kosten van de accu onlangs gedaald zijn, zal vervanging zeker rond de 3000 euro kosten als je vervanging van elektrische kabels, arbeidskosten en BTW meerekent. Geen geringe uitgaaf voor een auto van 8-10 jaar oud. Een afschrijftermijn van 5 jaar is voor mijzelf in ieder geval te kort. We praten tenslotte over duurzaamheid.

Het punt van de efficiëntieverstering door het gebruik van de motor bij optimaal toerental en het regenereren van remenergie heb ik onvermeld gelaten. Afgezien dat deze technieken ook toegepast zouden moeten worden bij de niet-hybride auto's

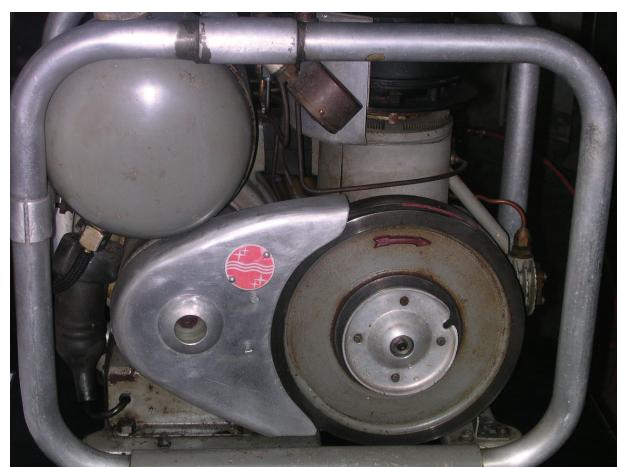
(waarom niet?) leidt het totaal voor de Toyota Prius tot een benzineverbruik van ongeveer 1:18. Een Fiat Panda (10 jaar ouder model) komt daar in de buurt. De hybride auto is dus wel zuinig, maar volgens mij niet innovatief en niet duurzaam genoeg.

In mijn column ben ik niet ingegaan op de problemen die bestaan met betrekking tot roterende kleppen. De firma Coates International Ltd echter meent de technische problemen rond roterende kleppen te hebben opgelost ([zie \[http://www.coatesengine.com/engine_of_the_future.html\]\(http://www.coatesengine.com/engine_of_the_future.html\)](http://www.coatesengine.com/engine_of_the_future.html)).

Met betrekking tot de verliezen in de huidige krukas wil ik opmerken dat deze niet alleen in de wrijving zitten maar meer ook in de optimale kracht overdracht op de krukas, de maximale druk tijdens de verbrandingfase en de variatie in moment gedurende de neergaande beweging van de zuiger. Bij een conventionele krukas zit je vast aan een roterend systeem, bij de Revetec motor is de zuigersnelheid in relatie tot de rotatiesnelheid van de krukas optimaal instelbaar ([zie <http://www.revetec.com/development.htm>](http://www.revetec.com/development.htm)).

Bedankt voor de reacties. De discussie is in ieder geval op gang gekomen.

Lo Bour



Een Stirling motor uit 1953.



Poincaré en het drielichamenprobleem

J.H. Poincaré, ‘Sur le problème des trois corps et les équations de la dynamique’,
Acta Mathematica 13 (1890) 1 – 270.

De prijsvraag

Enkele jaren voor zijn zestigste verjaardag, die op 21 januari 1889 viel, vroeg Oscar II, koning van Zweden en Noorwegen zich af hoe hij dat feit met gepaste luister zou kunnen vieren. Magnus Gösta Mittag-Leffler (1846 – 1927), hoogleraar wiskunde aan de universiteit van Stockholm, lid van een dertigtal buitenlandse wetenschappelijke academies en oprichter en hoofdredacteur van het tijdschrift *Acta Mathematica*, wist dat de koning tijdens zijn studie aan de universiteit van Uppsala in de wiskunde had uitgeblonken. Hij stelde daarom voor een wiskundige prijsvraag uit te schrijven over een nog steeds niet opgelost probleem, waar zelfs beroemde wetenschappers als Leonhard Euler en Joseph-Louis Lagrange hun tanden op stuk hadden gebeten, namelijk het (astronomische) drie-lichamenprobleem. Het twee-lichamenprobleem, bijvoorbeeld de planeten die onder invloed van de zwaartekracht om de zon draaien, was reeds door Isaac Newton, Pierre-Simon Laplace en Carl Friedrich Gauss exact opgelost, zíj het onder de aanname dat het om slechts twee (hemel)lichamen ging en geen baanstoringen vanwege een derde hemellichaam of remmende effecten (wrijving van de atmosfeer, stralendruk van de zon) aanwezig waren. Daarmee konden de elliptische Kepler-banen van de planeten en de parabolische banen van de kometen quantitatief worden berekend. Bij het drie-lichamenprobleem moest een derde hemellichaam (vanwege zijn grootte vaak Jupiter) mede in beschouwing worden genomen, maar dat probleem was tot dan toe niet opgelost. Het belang van het probleem



Jules Henri Poincaré.

lag in de vraag naar de stabiliteit van ons zonnestelsel en het onderzoek naar de mogelijkheid van een botsing tussen de planeten.

De koning stemde met de prijsvraag in: zijn naam zou dan voor altijd verbonden blijven aan de oplossing van een belangrijk probleem en hij kon een wetenschappelijke ‘Oscar’ uitreiken. Mittag-Leffler toog met verve aan het werk. Als mede-juryleden koos hij twee van Europa’s hoogstgereputeerde wiskundigen: Charles Hermite (1822 – 1901) van de Sorbonne-universiteit te Parijs en Karl Weierstrass (1815 – 1897) van de Technische Universiteit te Berlijn, toen nog ‘Gewerbeinstitut’ geheten. De vraagstelling, door Weierstrass veralgemeend tot een n -lichamenprobleem, met n een willekeurig geheel getal, luidde: “Gegeven een systeem van n lichamen ($n \geq 3$) die elkaar volgens de wet van de zwaartekracht aantrekken, en aannemende dat geen twee lichamen ooit zullen botsen, bepaal de coördinaten van de individuele lichamen

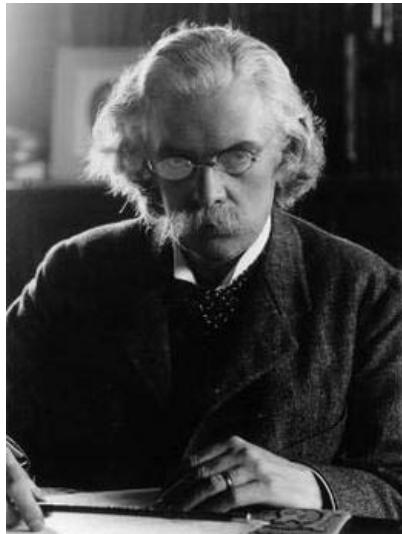
voor ieder tijdstip in verleden en toekomst als de som van een uniform convergerende reeks van machtsstermen bestaande uit bekende functies.”

Het antwoord diende anoniem te worden ingestuurd met slechts een motto op de envelop. Een tweede envelop met hetzelfde motto diende de naam van de inzender te bevatten en bleef gesloten tot aan de dag van de prijsuitreiking. De sluitingsdatum voor de inzendingen was bepaald op 1 juni 1888, een halfjaar vóór de verjaardag van de koning en het prijzengeld bedroeg een (nogal schamel) bedrag van 2500 Zweedse kronen (ter vergelijk: Mittag-Lefflers jaarsalaris als hoogleraar was 7000 kronen).

Twaalf inzendingen kwamen er binnen waarvan slechts drie volgens de jury ‘prijswaardig’ bleken. Geen van de drie bevatte een volledige oplossing maar over het 158 bladzijden tellende manuscript met als motto “Nunquam praescriptos transibunt sidera fines” (Nooit overschrijden sterren hun voorgeschreven grenzen) schreef de jury: “Ce travail ne peut être considéré comme fournissant une solution complète, mais il est d'une telle importance que sa publication ouvrira une ère nouvelle dans l'histoire de la mécanique céleste.”

Dat manuscript kreeg de prijs.

Aan de vooravond van ’s konings verjaardag werd op het kasteel te Stockholm onder grote belangstelling de tweede envelop met het motto geopend: de winnaar was Henri Poincaré, hoogleraar in de experimentele en theoretische mechanica aan de Sorbonne-universiteit te Parijs. Een andere inzender, Poincaré’s collega Paul Appell, hoogleraar wiskunde en later rector magnificus van de Sorbonne, verwierf een eervolle ver-



Magnus Gösta Mittag-Leffler.

melding. Heel Frankrijk blaakte van trots en Poincaré en Appell, evenals Mittag-Leffler werden met het ridderchap van de Légion d'Honneur bekleed. Op 23 maart 1889 reikte Graaf de Loewenhaupt, de Zweedse ambassadeur te Parijs, Poincaré het prijzengeld uit plus een gouden plak met de beeltenis van de koning – de 'Oscar'.

De laatste universalist

Jules Henri Poincaré werd op 29 april 1854 te Nancy geboren, als oudste zoon van een vooraanstaande familie. Hij was hoogbegaafd en blonk op school uit in alle vakken, met name in de wiskunde. Als schooljongen had hij een hekel aan zijn naam omdat die hetzelfde klonk als 'point carré' (vierkante punt) wat volgens hem 'wiskundig totaal niet kon'. Hij raakte met zijn naam verzoend toen hij vernam dat een oud-oom, die als officier van Napoleon in Rusland was gesneuveld, als Pontcarré (vierkante brug) door het leven ging. Die verzoening werd compleet toen hij, nog

verder in de stamboom teruggaand, ontdekte dat zijn voorvader uit de 14e eeuw secretaris was van koningin Elisabeth van Beieren en Jehan Poingcarré (vierkante vuist) heette. Poincaré studeerde aan de Parijse École Polytechnique en daarna aan de elite-opleiding École des Mines, waar hij in 1878 als mijnbouw-inspecteur afstudeerde. Het jaar daarop promoveerde hij bij Charles Hermite, tot doctor in de wiskunde. Omdat hij sterk bijziende was en nauwelijks op het bord kon kijken, schreef Poincaré op college nooit iets op. Maar dankzij zijn feilloos geheugen en zijn diep wiskundig inzicht wist hij al het gedoceerde perfect te reproduceren. Eens vroeg hem een mede-student of hij Poincaré's antekeningen mocht lenen aangezien hij het bewijs van een bepaalde stelling niet goed begreep, waarop Poincaré uit het hoofd het bewijs voor hem opschreef. Tijdens het werkcollege werd juist die mede-student voor het bord geroepen om het bewijs van de stelling te leveren. Na afloop vroeg de hoogleraar of de student het bewijs zelf had 'verzonnen'. De student ontdekte en wees Poincaré aan. Waarop de hoogleraar verklaarde: "Dit bewijs is veel eleganter dan het mijne en niet mijn maar dit bewijs dient in de syllabus te worden opgenomen". In 1879 werd Poincaré benoemd als hoogleraar wiskunde aan de universiteit van Caen, maar bleef in dienst van het Franse Mijnwezen en kreeg onbetaald verlof. Hoewel hij daarna nauwelijks meer als mijnbouw-inspecteur optrad, bereikte hij via automatische promoties uiteindelijk toch de allerhoogste rang van inspecteur-generaal. Na Caen werd Poincaré in 1881 benoemd tot maître de conférences aan de Sorbonne – een functie van adjunct-hoogleraar, verantwoordelijk

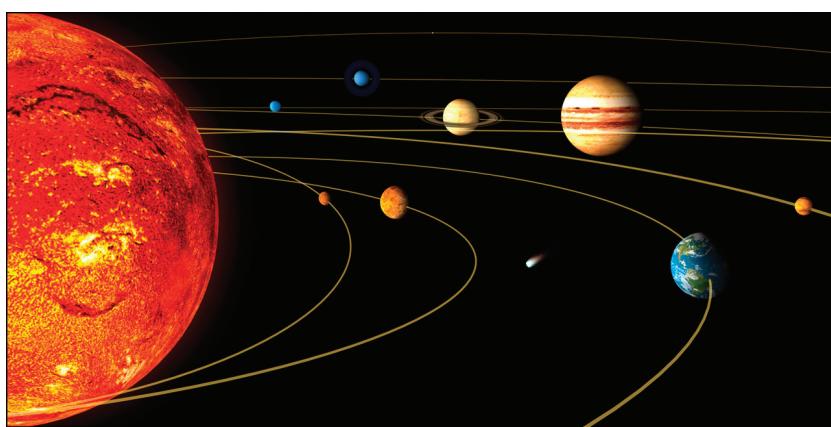


Oscar II, koning van Zweden en Noorwegen.

voor de werkcolleges. In 1885 volgde zijn benoeming tot gewoon hoogleraar in de mechanica. Successievelijk kwamen daar de professoraten bij van de mathematische fysica, de waarschijnlijkheidstheorie, de hemelmechanica en astronomie. In 1887 werd hij benoemd tot lid van de Académie des Sciences.

Wat de wiskunde betreft wordt Poincaré beschouwd als 'de laatste universalist' aangezien hij op alle gebieden van de toenmalige wiskunde, waaronder de differentiaalvergelijkingen, de getallentheorie en de complexe analyse, baanbrekende artikelen heeft geschreven en zelfs nieuwe gebieden heeft opgelegd, zoals de algebraïsche topologie – hij noemde dat 'analysis situs' – en de chaostheorie. Op het terrein van de topologie formuleerde hij de beroemde 'Poincaré conjectuur' (vermoeden), dat in 2000 door het Clay Mathematics Institute van de Harvard universiteit tot 'Millennium Probleem' werd uitgeroepen waarbij voor het bewijs ervan een miljoen dollar werd uitgeloofd. Het bewijs werd in 2006 door de Russische wiskundige Gregori Perelman geleverd, maar die weigerde zowel de prijs als de Fields Medaille – de 'Nobelprijs voor de wiskunde' – aan te nemen.

Wat de mathematische fysica aangaat rangschikt men Poincaré in hetzelfde rijtje van veelzijdige wetenschappers als Isaac Newton, Carl Friedrich Gauss en David Hilbert. Zijn theoretisch-fysisch werk omvat artikelen over hemelmechanica, mechanica van de vloeistoffen, kosmologie, thermodynamica, capillariteit, elasticiteit,



Ons planetenstelsel (afbeelding: ESA).

voor grote t divergeerden. Later kon men die functies schrijven in termen van trigonometrische functies met variabelen ($a_n t + b_n$), maar niemand had ooit bewezen dat die termen convergeerden. In tegenstelling tot zijn voorgangers pakte Poincaré het probleem rigoureus wiskundig aan en bewees dat de termen weliswaar niet convergeerden maar konden worden gebruikt voor een asymptotische benadering. De slotconclusie luidde dan ook dat het zonnestelsel stabiel was. Volgens afspraak zou het winnende essay in de *Acta Mathematica* worden gepubliceerd, een taak waarmee Edvard Phragmén, de eindredacteur van het tijdschrift en een assistent van Mittag-Leffler zich belastte. Phragmén was een uiterst consciëntieuze wiskundige die iedere zin naploos en iedere formule narekende. In juli 1889 rezen bij hem tijdens dat werk vragen over enkele zaken die hij niet goed begreep. Hij meldde dat aan Mittag-Leffler die de vragen aan Poincaré doorstuurde. Poincaré begon Phragmén's vragen in uitgebreide voetnoten te behandelen maar bij een bepaalde vraag sloeg hem de schrik om het hart. In zijn essay had hij vastgesteld dat drie lichamen in een zwaartekrachtssysteem uiteindelijk in een stabiele, een periodieke of een quasi-periodieke baan zouden belanden. Naar hij nu inzag had hij een vierde mogelijkheid over het hoofd gezien: een chaotische baan die op de lange termijn onvoorspelbaar was. Maandenlang probeerde hij onafgebroken om het artikel te repareren, maar tenslotte moest hij op 1 december 1889 aan Mittag-Leffler in een telegram zijn fout melden en hem vragen de drukpersen te stoppen. Te laat – proefexemplaren waren reeds aan enkele wiskundigen verzonden! “Je ne vous dissimulerai pas le chagrin que me cause cette découverte,” schreef hij aan Mittag-Leffler over de ontdekking van zijn fout en hij bood aan het prijzen-geld terug te storten. Maar daar wilde de Tweed niets van weten: niet alleen Poincaré zou geblameerd raken, ook de jury en de koning zouden in zijn val worden megesleurd. Mittag-Leffler begon onmiddellijk met de schadebeheersing. Poincaré, Hermite en Phragmén – de enigen die van de fout op de hoogte waren – legde hij een absoluut zwijgverbod op. De ontvangers van de proefexemplaren vroeg hij per telegram om die terug te sturen ‘omdat



Het familiegraf waarin Poincaré begraven ligt, op het Cimetière de Montparnasse in Parijs. Op het graf de briefjes van studenten met verzoeken om te helpen bij hun examens (foto: Herman de Lang).

telegrafie, electriciteit, elektromagnetisme, optica, speciale relativiteits-theorie en quantumtheorie. Na het winnen van de ‘Oscar’ heeft hij zijn wiskundig-astronomische bevindingen neergelegd in een driedelig werk ‘*Les méthodes nouvelles de la mécanique céleste*’ (1892 – 1899), dat in 1967 door NASA in het Engels opnieuw werd uitgegeven en nog steeds in de ruimtevaart wordt gebruikt.

Hij stierf op 17 juli 1912 en werd begraven op het Cimetière de Montparnasse. Wie zijn graf bezoekt vindt daarop steeds verse bloemen en met stenen bezwaarde briefjes met verzoeken om hulp bij examens of dankbetuigingen van Parijse middelbare scholieren.

Drielichamenprobleem

Het drielichamenprobleem werd gezien als één van de moeilijkste problemen van de astronomische mechanica. In zijn behandeling van het stelsel zon-aarde-maan had Joseph Louis Lagrange in zijn *Mémoire sur le problème des trois corps* (1772) de coördinaten van de drie (hemel)lichamen ontwikkeld als een machtreeks van de massa's van de lichamen, waarbij die van aarde en maan zeer klein ten opzichte van de massa van de zon werden genomen. De coëfficiënten van de reeks werden als functies van de tijd t via allerlei benaderingstechnieken berekend. Die functies bevatten echter termen zoals $t \cdot \cos(at + b)$ (a en b constanten), die

een ‘drukfout’ in de tekst was binnengeslopen en Poincaré eraan hechtte die te corrigeren’. Tot grote opluchting van Mittag-Leffler kreeg hij inderdaad alle exemplaren terug en daarna werd de hele oplaat van deel 13 van de Acta Mathematica tot pulp vermaleden. Slechts één enkel exemplaar hield hij in zijn persoonlijk archief achter. Verder creëerde hij aan de universiteit van Stockholm een leerstoel voor actuariële (verzekerings)wiskunde en vroeg Poincaré een aanbevelingsbrief voor Phragmén te schrijven zodat die daarop benoemd kon worden. Intussen kon Poincaré aan de verdere correctie van zijn fout werken.

Bij het drie-lichamenprobleem gaat het om een stelsel niet-lineaire differentiaalvergelijkingen in drie vrijheidsgraden. Wat Poincaré in zijn gecorrigeerde artikel beschreef was dat baanstoringen door terugkoppeling zich versterken en zo tot onvoorspelbare veranderingen van oorspronkelijk deterministische en principieel berekenbare banen konden leiden. Dat hield in dat ‘deterministische chaos’ bij een conservatief niet-lineair dynamisch systeem, zoals de banen van de planeten, kon ontstaan. Het artikel bevatte echter ook zijn beroemde ‘recurrentie theorema’, dat zegt dat een systeem waarin de energie behouden blijft, uiteindelijk naar zijn oorspronkelijke toestand terugkeert. Voor ons zonnestelsel betekent dit dat als de planeten zich van elkaar verwijderen, zij toch weer op termijn hun oorspronkelijke banen zullen innemen (al kan het zijn dat dit pas na een hele lange tijd gebeurt). De enige toespeling die hij op de voorafgaande moeilijkheden maakte was één enkele regel in de inleiding, waarin hij Phragmén bedankte voor het opmerkzaam maken van een ‘point délicat’ waardoor Poincaré een belangrijke fout kon ontdekken en rectificeren. Dat was alles!

De ‘damage control’ van Mittag-Leffler had wonderwel gewerkt. Toen het artikel van Poincaré – inmiddels uitgebreid met een honderdtal extra pagina’s – uiteindelijk verscheen, oogstte het onder wiskundigen algemene lof en werd het als een meesterwerk beschouwd. Pas na de dood van Mittag-Leffler, toen de tekst van het oorspronkelijke artikel boven water kwam, ontdekte men de omvang van de fout. Poincaré betaalde wel de drukkosten van de tweede editie van

deel 13 van de Acta Mathematica, die 3585 kronen en 65 øre bedroegen – ruim duizend kronen meer dan het geld van de Oscar-prijs.

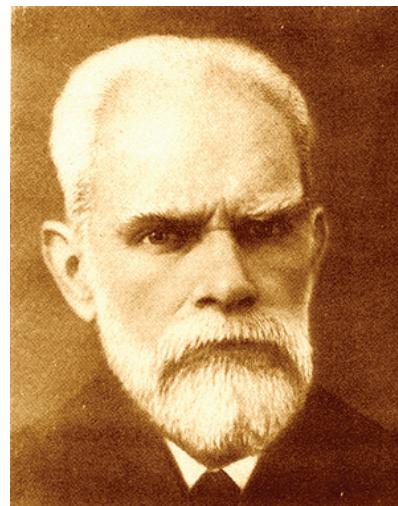
Hoewel het drie-lichamenprobleem niet stabiel bleek, bewees Poincaré dat de chaotische banen zeer zelden voorkwamen. In plaats van een absolute bewees hij een waarschijnlijke stabiliteit. “Men kan zeggen”, schreef hij, “dat de instabiele banen de uitzondering en de stabiele banen de regel vormen”.

In 1912 – het jaar dat Poincaré stierf – ontwikkelde de Finse wiskundige Karl Fritiof Sundman een oplossing voor het drielichamenprobleem, bestaande uit convergente reeksen. De convergentie gebeurde echter zo langzaam, dat vele termen nodig waren om een aanvaardbare precisie te krijgen, zodat zijn oplossing weinig praktische waarde had. De oplossing van het generaliseerde n -lichamenprobleem in machtrekken werd in 1990 gegeven door Qiu Dong Wang van de universiteit van Arizona te Tucson.

Stabiliteit

Poincaré gebruikte niet de term ‘chaos’, maar bezigde daarvoor de uitdrukking ‘sensibilité aux conditions initiales’: “Il peut arriver que de petites différences dans les conditions initiales engendrent de très grandes dans les phénomènes finaux; une petite erreur sur les premières produirait une erreur énorme sur les derniers. La prédition devient impossible et nous avons le phénomène fortuit”.

De mathematische chaostheorie beschrijft dus dynamische systemen (toestanden die zich met de tijd ontwikkelen) die zeer gevoelig zijn voor zelfs minieme storingen van de begincondities. Kleine veranderingen in de begintoestand leiden tot een exponentiële groei van de storingen en - hoewel het systeem deterministisch is, dat wil zeggen dat de dynamische ontwikkeling volledig door de begincondities zijn bepaald - tot een onvoorspelbaar gedrag van het systeem. Bij een dergelijk gedrag spreekt men van ‘discrete chaos’ of kortweg ‘chaos’, dat wil zeggen dat het systeem steeds veranderende maar geen oneindige waarden aanneemt en de term heeft dus niet de betekenis van volstrekte willekeur die er in het gewone spraakgebruik aan wordt gegeven. De tijds horizon waarin een chaotisch systeem nog voorspelbaar wordt geacht, heet



Aleksandr Lyapunov.

de Lyapunov-tijd τ , genoemd naar de Russische wiskundige Aleksandr Lyapunov (1857–1918). Bij een chaotisch systeem nemen de verstoringen met een factor $\exp(t/\tau)$ toe.

Voor $t \ll \tau$ is het systeem stabiel, dat is: voorspelbaar, maar voor $t \gg \tau$ niet meer.

Via numerieke studies op de computer toonde de astronoom Jacques Laskar van het Bureau des Longitudes te Parijs in 1990 aan dat ons zonnestelsel chaotisch is met een Lyapunov-tijd τ in de orde van 200 miljoen jaar. Tot aan die toekomst is het gedrag van ons zonnestelsel voorspelbaar maar dat wil niet zeggen dat na die tijd het zal ophouden te bestaan.

Herman de Lang

Nieuws

Nieuwe directeur KVI

Klaus Jungmann is 1 januari jongstleden begonnen als nieuwe directeur van het Kernfysisch Versneller Instituut in Groningen. Hij volgt daarmee Muhsin Harakeh op, die vanaf 1996 directeur was van het instituut. Jungmann is hoogleraar in de Experimentele Fysica en projectleider van het KVI TRIP programma.

Afgelopen december vierde het KVI ook zijn 40 jarig bestaan.

FYSICA 2009

FYSICA 2009 vindt op vrijdag 24 april 2009 plaats in Martiniplaza te Groningen. Alle vakinhoudelijke lezingen zijn Engelstalig, zodat het ook voor buitenlandse fysici interessant is aan het programma deel te nemen. In dit nummer van het NTvN wordt het programma reeds globaal weergegeven, in de komende nummers zullen diverse focussessies nader worden toegelicht. Opgave voor Fysica 2009 kan via www.fysica.nl.

60

Programma FYSICA 2009

09:15	Ontvangst, koffie en Fysicamarkt
10:15	Opening (Gerard van der Steenhoven)
10:30	Biomedical Physics – Monika Ritsch-Marte (Medizinische Universität Innsbruck)
11:15	Graphene – Kostya Novoselov (University of Manchester)
12:00	Physica Lezing – Leo Kouwenhoven (TUD)
12:45	Lunch en Fysicamarkt EPJ Poster Wedstrijd SPIN Bachelorproject Competitie
13:00	Algemene Ledenvergadering NNV
14:00	Start 6 focussessies a. 2009: Year of Astronomy b. Nanoscience and technology c. Physics of life d. Energy e. From LHC to Planck f. Student Session
15:30	Theepauze en Fysicamarkt
16:00	EPJ Posterprijs, SPIN Bachelorprijs, NTvN-prijs en natuurkundedoctor van het jaar prijsuitreikingen
16:15	Physics Education - NiNa - Peter Barthel (RUG)
16:45	Nobel Prize 2008 Lecture - Gerard 't Hooft (UU)
17:30	LHC - Jos Engelen (NWO)
18:30	Diner buffet
20:00	FYSICA 2009 publiekslezing: Energie in de 21 ^e eeuw (open voor algemeen publiek)
21:30	Sluiting (bar open voor verdere discussie)

Kosten

De deelnemersbijdragen en dinerkosten zijn vastgesteld volgens onderstaande tabel.

Bij aanmelding voor 1 april en betaling voor 10 april wordt een korting van € 5 berekend op de genoemde prijzen. Als leden gelden diegenen die lid zijn van een of meerdere van de volgende verenigingen: NNV, BPS, Klvl NIRIA, NVON, NVvF, NVR, VvB en BMT.

	Deelnemersbijdragen (€)	Dinerkosten (€)
Leden		
Studenten en gepensioneerden	17,50	17,50
Overig	37,50	37,50
Niet-leden		
Studenten en gepensioneerden	37,50	37,50
Overig	67,50	37,50

Wie zaait zal oogsten

In zijn Redactieel in NTvN 74-12 stelt Vincent Icke valorisatie gelijk aan onrechtvaardigheid en gebrek aan ontzag. "Valorisatie is de onrechtvaardigheid dat de maaiers als winners worden gezien en de zaaiers als losers."

Terecht stelt Icke in zijn bijdrage dat wetenschap en innovatie onvoorspelbaar zijn en hij wijst op de zegeningen die technologie ons gebracht heeft dankzij de onderliggende fundamentele wetenschap. Onafhankelijke creatieve geesten die nieuwe wegen inslaan, nieuwe dingen proberen, en niet bang zijn voor foute keuzes: juist zij liggen aan de basis van technologische vooruitgang. Het bedrijven van wetenschap is een onontvreemdbaar onderdeel van een technologische samenleving. Icke benadrukt terecht het belang van deze zaaiers.

Om in Icke's gelijkenis van zaaiers en maaiers te blijven: Al lang geleden was bekend "Tijdens het zaaien viel een deel van het zaad op de weg, en er kwamen vogels die het opaten. Een ander deel viel oprotsachtige grond, waar maar weinig aarde was, en het schoot meteen omdat het niet diep in de grond kon doordringen. Toen de zon opkwam verschroeide het, en omdat het geen wortel had droogde het uit. Weer een ander deel viel tussen de distels, en toen die opschoten verstikten ze het zaagoed. Maar er viel ook wat zaad in goede grond, en dat bracht vrucht voort, deels honderdvoudig, deels zestigvoudig, deels dertigvoudig."

Valorisatie is niet een tegenstander van wetenschappelijk onderzoek, behalve wanneer het als monomane beleidsmode wordt gehanteerd. Valorisatie zou wetenschap juist nog aantrekkelijker moeten maken. Zodra de creatieve geesten nieuwe verschijnselen hebben ontdekt, beschreven en begrepen, zijn er andere creatieve geesten nodig die de nieuwe kennis in dankbaarheid aanvaarden en ermee aan de slag gaan: Wat kan ik ermee? Hoe kan ik deze kennis ten nutte maken voor de mensheid? Hoe zorg ik ervoor dat de nieuwe verschijnselen zodanig beheerst en gemanipuleerd kunnen worden dat er (kosten-/ener-



gie-/grondstoffen-)efficiënte producenten, processen of diensten uit voortkomen? Kortom: wat kan ik ermee en wat heb ik eraan?

Dat zijn hele legitieme vragen, maar nou eenmaal een heel andere passie dan die van Icke. Icke heeft een passie voor het bevredigen van de menselijke nieuwsgierigheid. Anderen hebben een passie om al dat moois dat Icke en andere fundamentele wetenschappers ontdekken, toe te leren passen en er niet alleen iets moois, maar ook iets nuttigs mee te doen: de kennis van het kunnen.

Dat wetenschap op termijn ook nuttig kan zijn, is mooi. Zodra zich een kans voordoet om een ontdekking tot nut te maken, is het maximaliseren van de kans op toepassing een nobel streven. Er zit een lange weg tussen een ontdekking en een product: die weg heet valorisatie. Die weg wordt gekenmerkt door grote technisch-wetenschappelijke uitdagingen, high-risk, high-potential onderzoek van wereldklasse, multidisciplinaire samenwerking, systeemdenken en een voortdurende gerichtheid op die fascinerende vraag: wat kan ik ermee?

Tja, en tenslotte gaat iemand er misschien wel geld mee verdienen. Mooi toch? Maar dat mag nooit leiden tot minder appreciatie voor diegene die het allemaal in gang zette: de fundamentele wetenschapper.

De tegenstelling tussen de maaier en de zaaiers is onnodig. Vincent, eerder citeerde ik Mattheüs. Laat ik eindigen

met Johannes: "De maaier krijgt zijn loon al en verzamelt vruchten voor het eeuwige leven, zodat de zaaiers en de maaier tegelijk feest kunnen vieren."

Laten we samen het oogstfeest vieren.

Eppo Bruins

Directeur Technologiestichting STW

Mededeling

School-lidmaatschap

Sinds 2009 bestaat er ook een school-lidmaatschap van de NNV. Een school kan lid worden voor 150 euro per jaar (exclusief BTW). Daarvoor ontvangt de school elke maand drie exemplaren van het NTvN. Als een school nu lid wordt, ontvangt deze na de zomervakantie als welkomstgeschenk het boek 'Canon van de Natuurkunde' (zolang de voorraad strekt).

Inmiddels hebben diverse scholen zich al aangemeld. Aanmelden voor het schoollidmaatschap kan via bureau@nnv.nl.

De hardnekkige kilogram

- het SI op de schop

Charles-Edouard Guillaume, in 1920 winnaar van de Nobelprijs voor natuurkunde en directeur van het Bureau International des Poids et Mesures (BIPM), meende in 1927 dat de kilogram de komende 10.000 jaar gemeten kon worden met een relatieve onzekerheid van 10^{-8} . Amper 25 jaar later bleken de oorspronkelijke basiseenheden van het metrieke systeem ‘beperkter houdbaar’ dan was gedacht. Waar de seconde en de meter opnieuw werden gedefinieerd uitgaande van natuurconstanten, is de kilogram nog steeds per definitie gelijk aan de massa van één enkel tastbaar object, de ‘Grand K’, bewaard in een kluis van het BIPM in Sèvres, Parijs. Dat is een niet erg fysische oplossing, waar ook andere grootheden die van massa afhankelijk zijn zoals elektrische grootheden last van hebben. Dreigt de kilogram nu de bottleneck te worden voor de herziening van het *Système International d'Unités (SI)*? Inge van Andel, Helko van den Brom en Gert Rietveld

62

Het ontstaan van de kilogram

Het leek allemaal zo mooi toen in 1799 de meter en de kilogram werden geïntroduceerd als de eerste twee basiseenheden van een geheel nieuw decimaal metrieke systeem. Eindelijk zou er een einde komen aan de chaos in



Figuur 1 Een oorspronkelijke Nederlandse pond naast de opvolger, een Nederlandse pond met een loodkraagje om de massa op 1 kg te brengen.

de handel. Zo was een okshoofd een inhoudsmaat voor wijn die gelijk was aan zes ankers. De anker was gelijk aan 16 stoops en een stoop was gelijk aan 2 mingels of 4 pinten. Maar daarnaast was er nog een aam gelijk aan vier ankers of 1/6 deel van een vat. Om het nog erger te maken waren al die eenheden niet in elk gebied even groot (figuur 1) [1].

Een breed geaccepteerd decimaal metrieke systeem moest een einde maken aan al deze verschillende maten en gewichten, en de daarmee samenhangende handelsbeperkingen. Om dit revolutionair nieuwe systeem aan de man te brengen werden de basiseenheden zo gekozen dat iedereen het gevoel had dat de eenheden van hem waren: “à tous les temps, à tous les peuples” [2]. De meter werd gelijk gesteld aan één veertigmiljoenste deel van de aardmeridiaan en de gram gelijk aan de massa van 1 cm³ zuiver water van 4 °C. Makkelijk was dat niet: het viel

niet mee om een stuk van de aardmeridiaan te meten tijdens de Franse Revolutie [3], en water was geen goede keuze, omdat het beweegt en verdampft. Dus diende de eenheid van massa geïsoleerd te worden in een materiaal dat wel vormvast was, niet oxideerde en hard genoeg was: platina, waar later 10% iridium aan werd toegevoegd om de hardheid te vergroten.

Ook al werd het metrieke stelsel in steeds meer landen ingevoerd, in de dagelijkse praktijk bleef iedereen vasthouden aan zijn eigen oude eenheden. Ten einde raad werd daarom in 1875 het BIPM in Sèvres opgericht. Op een conferentie van wetenschappelijke vertegenwoordigers uit de belangrijkste handelslanden werden afspraken gemaakt over het in de praktijk invoeren van het metrieke stelsel. Aan het einde van de conferentie tekenden zeventien landen de zogenoemde Meterconventie. Nederland hoorde daar niet bij, omdat de Nederlandse hoog-

leraar Bosscha [1] meende dat het BIPM geen wetenschappelijke waarde zou krijgen. Hij had het mis, want de nieuwe meter en kilogram begonnen terrein te winnen.

Uiteindelijk tekende Nederland in 1929 ook de Meterconventie en in 1953 kochten we een eigen nationale kilogram om zelf de massametingen binnen Nederland internationaal herleidbaar te kunnen maken. Deze kopie van de Grand K, genaamd PtIr53, wordt bewaard bij het nationale standaardeninstituut VSL in Delft (figuur 2). Tegenwoordig is het SI volledig doorgevoerd in wetenschap en (op enkele landen na) ook in het dagelijks leven. Waarom kunnen we dan toch niet de komende 10.000 jaar verder met de Grand K?

Het probleem met de kilogram

Het probleem met de kilogram is de definitie van de kilogram als de massa van een uniek object dat vervuilt en daarom eerst op heel speciale wijze handmatig schoongemaakt dient te worden (zie kader ‘Schoonmaakprocedure’). Eens in de paar decennia wordt de internationale kilogram vergeleken met zoveel mogelijk nationale kilogrammen. In de jaren 1989-1992



Figuur 2 De Nederlandse kopie van de Grand K, genaamd PtIr53, wordt bewaard bij VSL in Delft.

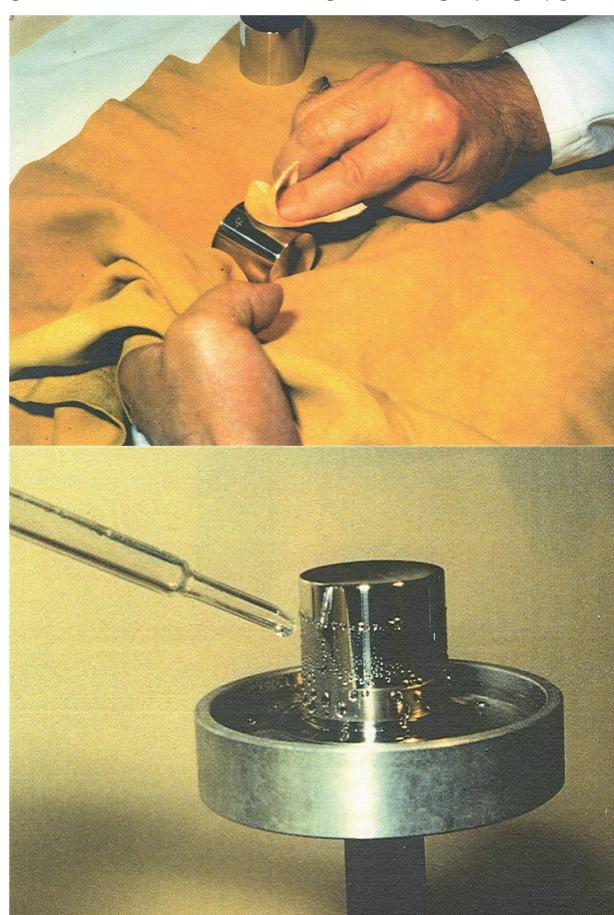
Schoonmaakprocedure

Het schoonmaken van een platina-iridium kilogram is een complex proces [4]. De chamois leren doek waarmee het massastuk afgenoem moet worden, moet eerst 48 uur weken in een oplossing van gelijke delen ethanol en ether. Nadat de doek is uitgewrongen, moet de doek nog twee keer helemaal ondergedompeld en uitgewrongen worden. Daarna moeten alle oppervlakken van het massastuk zorgvuldig en stevig gepoetst worden met de doek, waarbij ongeveer een druk van ongeveer 10 kPa moet worden uitgeoefend. Vervolgens wordt de kilogram onder een soort stoomdouche van dubbel gedestilleerd water gezet, waarbij de ‘douchekop’ op circa 5 mm afstand staat en het massastuk rond draait op een (vooraf op dezelfde manier schoongemaakt) plateau. Na zo’n 15-20 minuten wordt het overtollige water druppel voor druppel voorzichtig geabsorbeerd met een filterpapiertje zonder het metaaloppervlak aan te raken of droog gespoten met een schoon gas. Daarna wordt het massastuk omgekeerd zodat de onderkant gedaan kan worden en het zijvlak voor een tweede keer. Tenslotte moet de kilogram enkele dagen acclimatiseren onder een glazen stolp.

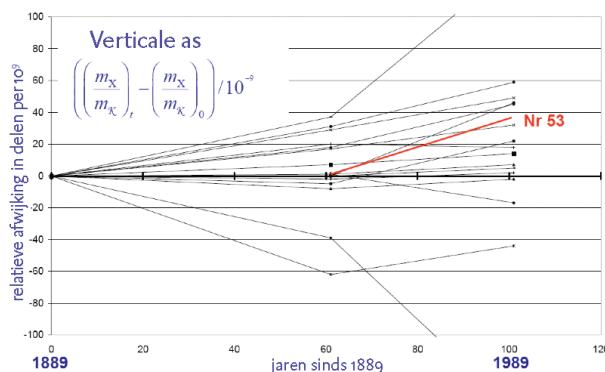
werd duidelijk dat de nationale kilogrammen en de Grand K steeds meer van elkaar waren gaan verschillen (figuur 4). Komt dat omdat de nationale kilogrammen meer gebruikt worden en dus meer vervuilen en slijten

of heeft de Grand K toch een beetje last van gewichtsverlies? Het vervelende is dat er geen hogere massastandaard is om dat te controleren!

En hoe erg is die mogelijke 50 µg drift



Figuur 3 De Grand K moet volgens een speciale procedure met een leren doek worden gepoetst (boven) en schoongemaakt met dubbel gedestilleerd water (onder) (Met dank aan R. Davis, BIMP.).



Figuur 4 Verloop van de nationale PtBr standaarden ten opzichte van Grand K in de tijd. Merk op dat het groepsgemiddelde steeds verder van Grand K afwijkt.

van Grand K over de afgelopen 119 jaar? De meeste massabepalingen zijn relatief ten opzichte van elkaar, waardoor de systematische afwijking ten gevolge van de drift wegvalt. Maar het pro-

bleem zit dieper. Ook eenheden als de newton, pascal en zelfs de ampère, die is gedefinieerd via de kracht tussen twee stroomdraden, zijn afhankelijk van de kilogram. Voor een robuust SI

is een onveranderlijke kilogram nodig en daar voldoet de Grand K niet aan. De nieuwe kilogram dient daarom gebaseerd te worden op natuurconstanten, net als de seconde en de meter.



Figuur 5 Bol gefabriceerd uit een staaf zeer zuiver silicium als realisatie van de kilogram (Met dank aan P. Becker, PTB.).

Elektrische eenheden

64

De basiseenheid voor elektriciteit in het SI is de ampère. Deze is vastgelegd als “de constante stroom die, indien hij wordt onderhouden in twee evenwijdige, rechtlijnige en oneindig lange geleiders van te verwaarlozen cirkelvormige doorsnede, welke geplaatst zijn in het luchtdige op een onderlinge afstand van 1 meter, tussen deze twee geleiders een kracht veroorzaakt gelijk aan 2×10^{-7} newton voor iedere meter lengte”. Een praktische realisatie hiervan levert een relatieve onzekerheid van een paar maal 10^{-7} .

In plaats daarvan wordt sinds 1990 gebruik gemaakt van de wet van Ohm ($I=V/R$), en worden de volt en de ohm gerealiseerd aan de hand van twee quantummechanische natuurverschijnselen: het Josephson-effect en het Quantum-Hall-effect.

Het Josephson-effect treedt op bij een overgang van twee supergeleiders gescheiden door een dunne isolerende laag. De gelijkspanning V over zo'n overgang hangt slechts af van de frequentie f van een aangelegd hoogfrequent signaal en van natuurconstanten: $V=f/K_J$, waarbij $K_J=2e/h$, met h de constante van Planck en e de elektronlading. De frequentie f is zelf ook gerelateerd aan een natuurverschijnsel (de atoomklok) en kan zeer nauwkeurig worden bepaald, ideaal voor een standaard voor spanning dus.

Het quantum-Hall-effect is de quantumversie van het gewone Hall-effect. Als een magnetisch veld wordt aangelegd loodrecht op een geleider waar gelijkstroom door-

heen loopt, zal de Lorentzkracht de elektronen afbuigen, waardoor een spanning ontstaat evenredig met (maar loodrecht op) zowel de stroom als het magneetveld. Voor een effectief twee-dimensionale geleider vertoont de Hall-spanning stappen als functie van het magneetveld: $V=R_K \cdot I$, met $R_K=h/e^2$. De verhouding tussen deze quantum-Hall-spanning en de aangelegde stroom levert dus een quantumstandaard voor weerstand.

Het quantum-Hall-effect en het Josephson-effect zijn zeer reproduceerbaar. Zo kunnen we twee Josephsonspanningen van 10 volt met elkaar vergelijken met een onzekerheid van een paar nanovolt (relatief een paar maal 10^{-10}). De waarden van h en e zijn echter tot op heden niet zo nauwkeurig gemeten. Daarom is in 1990 besloten om afgesproken, vaste waarden van R_K en K_J te gaan gebruiken in elektrische precisiemetingen. Zo is de onzekerheid van deze twee constanten $R_{K_{90}}$ en $K_{J_{90}}$ in termen van de SI-ohm en de SI-volt niet beter dan respectievelijk $1 \cdot 10^{-7}$ en $4 \cdot 10^{-7}$, maar kunnen spanningsmetingen en weerstandsmeetingen uitgedrukt in $R_{K_{90}}$ en $K_{J_{90}}$ toch veel lagere onzekerheden opleveren.

Deze situatie, waarbij elektrische metingen zich eigenlijk afgescheiden hebben van het SI, zou verholpen kunnen worden door een herdefinitie van de ampère in termen van het aantal ladingen per seconde, waarvoor dan wel de elektronlading e en de constante van Planck h vastgelegd moeten worden. Maar die moeten alleen wel eerst voldoende nauwkeurig gemeten kunnen worden...

Mogelijke realisaties van een nieuwe kilogram

Natuurlijk moet de nieuwe kilogram dezelfde waarde hebben als Grand K. Verder moeten er minstens drie onafhankelijke meetopstellingen in de wereld zijn waar de kilogram bepaald kan worden, uiteraard consistent met elkaar en regelmatig beschikbaar. Tenslotte moet de nieuwe kilogram voldoende nauwkeurig zijn, met een maximale relatieve standaardonzuikerheid van $2 \cdot 10^{-8}$ oftewel $20 \mu\text{g}$ op een kilogram, vier maal zo groot als de huidige onzekerheid.

Het meest voor de hand ligt een definitie op basis van de massa van een bepaald atoom. Voor de praktische realisatie kies je een groter object dan een atoom, bijvoorbeeld een bol van een kilogram gemaakt van silicium (figuur 5). Daar kun je éénkristallen van groeien met bijna perfecte structuur en zuiverheid. Bepaal het aantal atomen van zo'n bol en vergelijk de massa met die van Grand K. Effectief betekent dit een bepaling van de Avogadro constante N_A , het aantal atomen in 1 mol stof, en wel volgens:

$$N_A = \frac{V_{NA}}{V_a} = \frac{V \cdot (M_{Si}/m)}{a^3/n} = \frac{n \cdot V \cdot M_{Si}}{a^3 \cdot m} \quad (1)$$

waarbij V_{NA} en V_a respectievelijk het molaire volume en het atomaire volume zijn. Voor de bepaling van het molaire volume V_{NA} worden de massa m en het volume V van de silicium bol gemeten en de molaire massa M_{Si} van silicium. Voor de bepaling van het atomaire volume V_a moet de lengte a van de ribbe van de kubische eenheidscel worden gemeten en het effectieve aantal atomen n in die eenheidscel.

Een andere manier om de kilogram te definiëren is met de zogenoemde wattbalans (figuren 6 en 7). Met dit apparaat wordt eerst een statische meting uitgevoerd waarbij de zwaartekracht op een massa m bij een valversnelling g in balans wordt gebracht met de Lorentzkracht op een geleidende draad met lengte L (die onderdeel is van een spoel) loodrecht op een zo homogeen mogelijk magneetveld B door de stroom I door de spoel bij te regelen: $m \cdot g = B \cdot L \cdot I$. Vervolgens wordt

Kilogram op basis van h

Voor een herdefinitie van de kilogram in termen van natuurconstanten heeft een definitie gebaseerd op de constante van Planck h de voorkeur. Ten eerste geven de wattbalansen momenteel de meest nauwkeurige resultaten, en ten tweede heeft de constante van Planck vanwege haar prominente rol in de quantummechanica ook fundamenteel gezien de voorkeur. Uit de definities van de Josephson-constante $K_J=2 \cdot e/h$ en de von-Klitzing-constante $R_K=h/e^2$ (zie ook kader 'Elektrische eenheden') volgt dat we de constante van Planck kunnen schrijven als $h=4/(K_J^2 \cdot R_K)$. Omdat V evenredig is met $1/K_J$ en weerstand met R_K bevat het product $V \cdot I$ ook de combinatie $K_J^2 R_K$. We zien dan ook met behulp van formule (2) dat de wattbalans massa relateert aan de constante van Planck.

Dit leidt tot een aantal nieuwe mogelijke definities van de kilogram [5]: De meest eenvoudige is 'De kilogram is de massa van een lichaam in rust zodanig dat de waarde van de constante van Planck h exact gelijk is aan $6,62606896 \cdot 10^{-34}$ joule seconde.'

Of gebruikmakend van Einsteins $E=m \cdot c^2$ en Plancks $E=h \cdot f$: 'De kilogram is de massa van een lichaam in rust waarvan de equivalente energie gelijk is die van $299792458 \cdot 10^{27}$ optische fotonen met een golflengte in vacuüm van 662,606896 nanometer.'

Of in termen van de de-Broglie-golflente $\lambda=h/(m \cdot v)$: 'De kilogram is de massa van een lichaam waarvan de de-Broglie-golflente exact $6,62606896 \cdot 10^{-34}$ meter is wanneer het beweegt met een snelheid van exact één meter per seconde.'

65

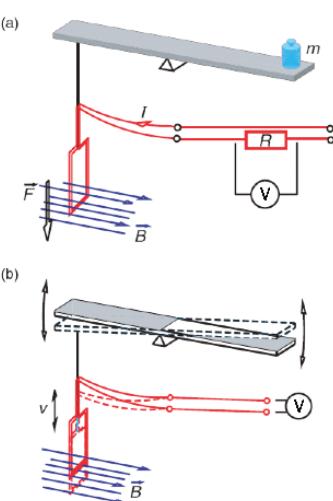
een dynamische meting verricht waarbij de spoel met constante snelheid v door hetzelfde magneetveld B wordt bewogen. De geïnduceerde spanning $V=B \cdot L \cdot v$ wordt vervolgens gemeten. Door deze twee metingen te combineren wordt de lastig te bepalen invloed van het magneetveld en van de lengte van de stroomdraad geëlimineerd. We vinden zo dat:

$$V \cdot I = m \cdot g \cdot v, \quad (2)$$

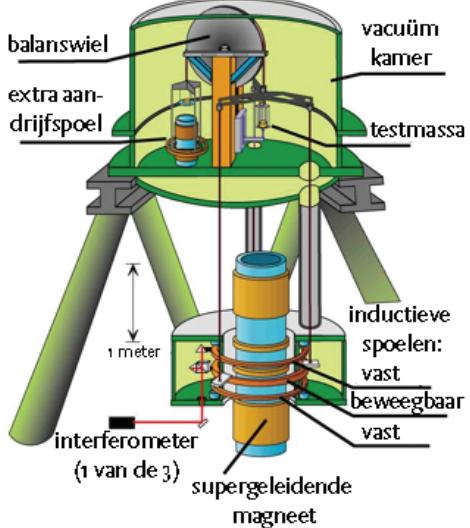
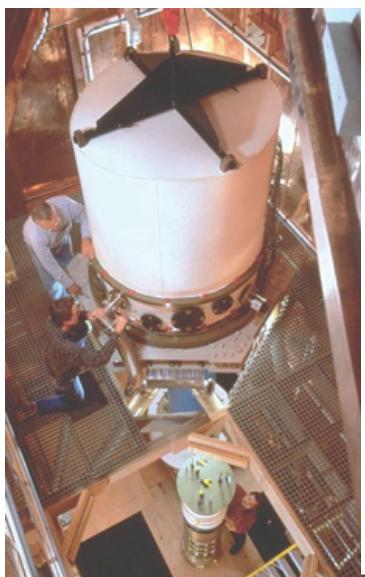
oftewel elektrisch vermogen is gelijk aan mechanisch vermogen, vandaar de naam 'wattbalans'. De spanning en de stroom in dit experiment worden gemeten met behulp van het Josephson-effect en het quantum-Hall-effect (zie kader 'Elektrische eenheden'). De snelheid en de lokale valversnelling zijn door middel van een laserinterferometer en een atoomklok met meer dan voldoende lage onzekerheid te bepalen.

Het product $V \cdot I$, en dus ook massa, is rechtevenredig met de constante van Planck h (zie kader 'Kilogram op basis van h '). Door dit experiment uit te voeren met de Grand K, kan de constante

van Planck h worden bepaald en vervolgens dienen als basis voor een 'elektronische kilogram'. Met de wattbalans en de nieuwe waarde van h kan vervolgens massa gemeten worden. Een definitie van de kilogram op basis van de constante van Planck (zie



Figuur 6 Principe van de watt-balans: een statische meting waarin zwaartekracht en Lorentzkracht in balans zijn (a) en een dynamische meting waarin inductiespanning wordt bepaald (b) (Met dank aan A.L. Eichenberger, METAS.).



Figuur 7 De wattbalans bij NIST, schematisch weergegeven (rechts) en in werkelijkheid (links) (Met dank aan R.L. Steiner, NIST.).

kader ‘Kilogram op basis van h ’) heeft de voorkeur. De constante van Planck is voor de quantummechanica wat de lichtsnelheid is voor de relativiteitstheorie. De lichtsnelheid is al vastgelegd in de definitie van de meter. Het ligt dus voor de hand om ook de constante van Planck vast te leggen, in een nieuwe definitie van de kilogram. En als nu ook de elementaire lading e in een nieuwe definitie van de ampère wordt vastgelegd, zijn de afgesproken waarden voor de Josephson-constante en de von-Klitzing-constante niet meer nodig en kunnen we de elektrische eenheden weer gewoon uitdrukken in SI-eenheden (zie kader ‘Elektrische eenheden’).

Stand van zaken

De twee wattbalansen die momenteel operationeel zijn, van het Amerikaanse National Institute of Standards and Technology (NIST) en het Engelse National Physical Laboratory (NPL), halen op dit moment de laagste relatieve onzekerheden, net even groter dan de gewenste $20 \cdot 10^{-9}$. Het grote probleem is echter dat de meest recente NIST en NPL resultaten strijdig zijn met elkaar (zie figuur 8). Bovendien verschilt de kilo zoals bepaald in het Avogadro-project maar liefst $1100 \cdot 10^{-9}$ van het NIST wattbalans resultaat! Met man en macht wordt momenteel gewerkt aan het verkleinen van de meetonzekerheden en het oplossen van de gevonden inconsistenties.

NIST en NPL zijn samen bezig om te oorzaak te vinden van de discrepancie tussen hun wattbalansresultaten

en daarnaast werken het BIPM en de standaardeninstituten van Frankrijk (LNE) en Zwitserland (METAS) aan een eigen wattbalans. Het Avogadro-project, een samenwerking van zes instituten, is ook hard bezig met een verbeterslag. De huidige resultaten zijn behaald met bollen van natuurlijk silicium. In de analyse van deze resultaten bleek de bepaling van de relatieve gehaltes van ^{28}Si , ^{29}Si en ^{30}Si een belangrijke beperkende factor te zijn. Recent is daarom door het Russian Atom Agency met behulp van ultracentrifuges 99,994 % zuiver ^{28}Si geproduceerd waarmee twee nieuwe silicium bollen zijn gemaakt. Bij de productie van het éénkristal waaruit de bollen zijn gemaakt is bovendien gewerkt aan het verminderen van roosterfouten – een tweede belangrijke onzekerheidsbron.

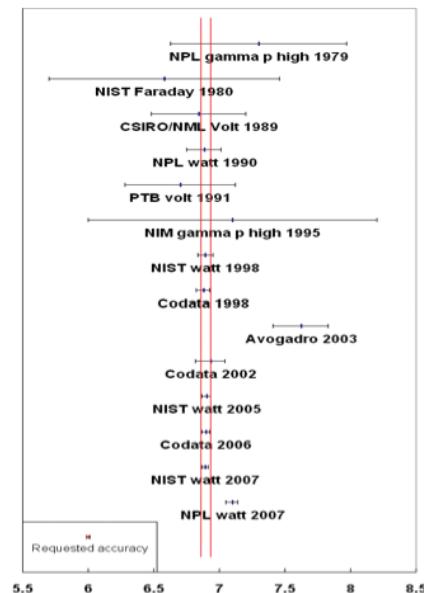
De resultaten van al deze inspanningen moeten in 2010 beschikbaar zijn, want dan kunnen ze nog meegenomen worden in 2011 op de Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM), waar regeringsvertegenwoordigers beslissen over nieuwe eenheden, nieuwe natuurconstanten en de herziening van het SI. De CGPM komt maar eens in de vier jaar bij elkaar.

Wat zijn de gevolgen?

Wat het CGPM ook besluit, we zullen in het dagelijks leven weinig van een nieuwe kilogram merken. Onze personenweegschaal zal geen grammetje minder aanwijzen. De nieuwe kilogram sluit immers naadloos aan op de oude en dat de onzekerheden iets om-

hoog gaan merken vermoedelijk alleen de laboratoria die zeer nauwkeurige metingen doen. Bovendien zullen in de praktijk van alledag nog steeds tastbare massastandaarden worden gebruikt omdat zowel de wattbalans als het Avogadroproject kostbare en complexe meetopstellingen vereisen. Verandert er dan helemaal niets? Zeker wel! Elektrische meetwaarden uitgedrukt in de nieuwe SI-volt en de SI-ohm kunnen worden afgegeven met aanzienlijk kleinere meetonzekerheid. En op de langere termijn profiteren ook massametingen van een nieuwe, onveranderlijke kilogram.

Het nieuwe SI gebaseerd op natuurconstanten zal ook gunstig zijn voor de wetenschap. Op dit moment is de onzekerheid in de waardebepaling van een groot aantal fundamentele constanten beperkt door de koppling met massa, gebaseerd op Grand K. Overgang naar een kilogram gebaseerd op h of N_A levert onzekerheden op die een factor 10 tot 100 lager zijn [5]. De enigen die echt een probleem kunnen krijgen met de nieuwe kilogram, zijn docenten die de nieuwe definitie aan hun leerlingen moeten uitleggen. Welke definitie de voorkeur



Figuur 8 Experimentele gevonden waarden van de constante van Planck, uitgedrukt als $[h/(10^{34} \text{ Js}) - 6.6260] \cdot 10^{-5}$ (dat wil zeggen de grootte van het 6^e significante cijfer). Eens in de vier jaar worden de experimentele waarden tot dan toe geëvalueerd en vastgesteld als zogenoemde Codata-waarden. De rode lijnen geven de onzekerheid van de Codata 2006 (Met dank aan A.L. Eichenberger, METAS.).

Inge van Andel studeerde Experimentele Natuurkunde aan de Universiteit Leiden en is in 1985 afgestudeerd op de absorptie van vloeibaar helium aan glasbolletjes. Na gewerkt te hebben bij Fokker Space & Systems en in het onderwijs, werkt ze nu sinds 8 jaar als wetenschappelijke medewerkster bij NMI VSL, en is verantwoordelijk voor massa en gerelateerde grootheden.

ivandel@nmi.nl



Helko van den Brom promoveerde in 2000 aan de Universiteit Leiden op ruis en geleiding in atomaire puntcontacten. Sindsdien werkt hij bij NMI VSL aan de ontwikkeling van elektrische quantumstandaarden. Als eerste wetenschappelijk medewerker is hij verantwoordelijk voor beheer en ontwikkeling van de nationale DC en laagfrequent elektrische meetstandaarden

hvdbrom@nmi.nl



Gert Rietveld studeerde Technische Natuurkunde aan de TU Delft en promoveerde daar in 1993 op spectroskopie aan hoge temperatuur supergeleiders. Hij is als senior scientist verbonden aan het VSL, het nationale metrologie-instituut van Nederland, waar zijn huidige onderzoeksgebied loopt van precisie quantum-Hall metingen aan grafeen tot aan vermogensmetingen in het hoogspanningstransportnet.

grietveld@nmi.nl



ook krijgt (zie enkele voorbeelden in het kader Kilogram op basis van h), het is bijna niet uit te leggen! Nee, dan was "de kilogram is gelijk aan de massa van het internationale prototype van het kilogram" een stuk eenvoudiger...

Agenda



1-6 februari 2009

ICQNM 2009, The Third International Conference on Quantum, Nano and Micro Technologies, Cancun, Mexico, www.iaria.org/conferences2009/ICQNM09.html. www.iaria.org/conferences2009/CfpICQNM09.html.

16-27 februari 2009

Postgraduate AIO/OIO School 2009 Theoretical High Energy Physics (THEP), www1.phys.uu.nl/drstpc/.

4-6 maart 2009

6th International Conference on Biomedical Applications of Nanotechnology, Berlin, <http://nmog.nanoevents.de>.

23-26 maart 2009

Ter ere van het 75-jarig bestaan van het Nederlands Akustisch Genootschap wordt het NAG-DAGA-congres georganiseerd in de Doelen te Rotterdam. Tevens is er de ALV en is er nog plaats om een presentatie te houden. Meer info: www.nag-daga.nl.

23 maart - 3 april 2009

Postgraduate AIO/OIO School 2009 Statistical Physics and Theory of Condensed

Referenties

- 1 R. Muijlwijk, 'Weet wat je meet', Aramith (1995).
- 2 Uitspraak van Marie Jean Antoine Nicolas de Caritat, marquis de Condorcet, secretaris van de Académie des Sciences en voorvechter van het nieuw decimale metriek systeem.
- 3 K. Alder, 'De maat van alle dingen', Anthos (2005).
- 4 G. Girard, *The washing and cleaning of kilogram prototypes at the BIPM* (1990).
- 5 I.A. Mills et al, 'Redefinition of the kilogram: a decision whose time has come', *Metrologia* 42, pp. 71-80 (2005).

67

Matter www1.phys.uu.nl/drstpc/.

31 maart - 4 april 2009

ShowPhysics2009, in Genève, Zwitserland, www.physique.ch>ShowPhysics2009.html.

t/m 19 april 2009

Vanwege het 400-jarig bestaan van de telescoop is er in Museum Boerhaave een kleine tentoonstelling over de ontwikkeling van de telescoop. Meer info: www.museumboerhaave.nl.

24 april 2009

Fysica 2009, Martini Plaza te Groningen, www.fysica.nl.

t/m 10 mei 2009

Tentoonstelling Dejacht naar het absolute nulpunt, Museum Boerhaave in Leiden. 100 jaar geleden maakte Kamerlingh Onnes als eerste helium vloeibaar. En ook nu nog is de race naar het allerkoudste in volle gang. Meer informatie: www.museumboerhaave.nl.

14-15 mei 2009

8th biennial symposium of the Dutch Research School of Theoretical Physics

www1.phys.uu.nl/drstpc/

4 juni 2009

Techniektoernooi 2009, www.techniektoernooi.nl

**Exact
wat u nodig
heeft**



Eurofysica®

INSTRUMENTEN

Instrumenten, apparatuur
en meubilair voor
natuurwetenschappen.



www.eurofysica.nl



Nederlandse Natuurkundige Vereniging



APRIL 24, 2009

MARTINIPLAZA, GRONINGEN

www.fysica.nl

Fysica 2009

Plenary lectures:

- J. Engelen The LHC
- K. Novoselov Graphene
- M. Ritsch-Marte Biomedical Physics
- P. Barthel The New Physics Education
- L. Kouwenhoven Physica Lecture
- G. 't Hooft Nobel Prize Physics 2008

Focus sessions:

- From Planck to LHC
- Nano-Science
- 2009: Future of Astronomy
- Physics of Life
- Energy
- Student session

Evening programme:

- Energy in the 21st century
- Open to the general public

Illustrations: E. Platen & R. Boomsma, design: N. Bos

