



Universiteit
Leiden

The Netherlands

Sjoelen met elektronen

Molen, S.J. van der

Citation

Molen, S. J. van der. (2022). *Sjoelen met elektronen*. Leiden: Universiteit Leiden. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/3485119>

Version: Publisher's Version

License: [Leiden University Non-exclusive license](#)

Downloaded from: <https://hdl.handle.net/1887/3485119>

Note: To cite this publication please use the final published version (if applicable).

Prof.dr.ir. Sense Jan van der Molen

Sjoelen met elektronen



Universiteit
Leiden

Bij ons leer je de wereld kennen

Sjoelen met elektronen

Oratie uitgesproken door

Prof.dr.ir. Sense Jan van der Molen

bij de aanvaarding van het ambt van Hoogleraar

Fysica van de gecondenseerde materie

aan de Universiteit Leiden

op vrijdag 21 oktober 2022.



**Universiteit
Leiden**

Waarde rector magnificus, geacht faculteitsbestuur, waarde collega's, waarde studenten, geachte toehoorders!

Het is een eer om u vandaag het een en ander te mogen vertellen. Over de natuurkunde. Over mijn vakgebied, de fysica van de gecondenseerde materie. En in het bijzonder over mijn onderzoek.

De titel van deze oratie is: *Sjoelen met elektronen*. Zo'n titel verdient toelichting. Want wat is sjoelen? En wat zijn elektronen? En kunnen die samen gaan?

Laten we eens beginnen bij de bron van alle snelle kennis: Wikipedia. Die zegt:

*Sjoelen is een gezelschapsspel, waarbij de spelers in drie beurten 30 schijven door vier kleine gleufjes op het einde van de plank moeten schuiven.*¹

Niet heel helder, vind ik, maar u kunt zich de sjoelbak hopelijk goed voorstellen. U weet dat een schijfje door een gleufje kan gaan, kan terugkaatsen, of zo vervelend kan blijven hangen rond het gat.

Maar dan het elektron: *Het elektron is een negatief geladen elementair deeltje*, volgens Wikipedia.²

Dat is wat lastiger. Want wat is een deeltje? En wat is de rol van dit deeltje? En is zo'n deeltje wel echt een deeltje? Dit zijn vragen waar de natuurkunde een antwoord op heeft gezocht, vooral in de laatste 150 jaar. Kortom om u uit te leggen wat ik met deze titel bedoel en wat die uiteindelijk met mijn onderzoek te maken heeft, moet ik beginnen bij het begin: Wat is natuurkunde?

Natuurkunde is de wetenschap van de levenloze natuur, bijvoorbeeld licht, materie of zwaartekracht. Zoals alle wetenschappen is de natuurkunde een product van menselijke nieuwsgierigheid. Van het stellen van vragen!

Wat is licht precies? Hoe brandt de zon? En gaat die ooit uit? Kan iets oneindig snel gaan? En wat is eigenlijk een metaal?

Allemaal vragen waar oorspronkelijk filosofisch of theologisch over werd gedebatteerd. Belangrijke exercities, maar niet genoeg om te begrijpen hoe het echt zit. Daar bleek iets anders

voor nodig: het experiment. Of preciezer nog: de wetenschappelijke methode. Dat is een soort recept voor goede wetenschap. En dat recept gaat als volgt:

We stellen een vraag. Bijvoorbeeld: *hangt de versnelling door de zwaartekracht af van de massa van een object?* Of makkelijker gezegd: *valt een kogel van drie kilo even hard naar beneden als een van tien kilo?* Vervolgens stellen we een hypothese op. Een vermoeden. Bijvoorbeeld: *elk object valt even snel naar beneden*. Daarna bedenken we een experiment dat het vermoeden toetst. We laten bijvoorbeeld twee kogels van drie en tien kilo tegelijk van een toren vallen en kijken of de een eerder de grond raakt dan de ander. Dan volgt een analyse: we kijken of het resultaat van het experiment klopt met de hypothese. Zo nee, dan moeten we de hypothese verwerpen en iets nieuws proberen. Zo ja, dan kunnen we voortbouwen. De vraag verfijnen, betere experimenten doen en zo verder komen.

Als we dat blijven doen, kunnen we komen tot een zogeheten theorie. Een theorie is een beschrijving van de natuur voor zover we die kennen. Een voorbeeld is de zwaartekrachtstheorie van Newton. In Newtons theorie zit op natuurlijke wijze ingebakken dat elke massa even snel valt, zolang de luchtweerstand te verwaarlozen is. Daarmee gebruikte Newton experimentele kennis van Simon Stevin.³ Want Stevin was degene die daadwerkelijk kogels van een toren liet vallen. En zag dat ze tegelijk neerkwamen.

Een goede theorie kan niet alleen beschrijven, maar ook voorspellingen doen. Voorspellingen die kunnen worden getoetst met nieuwe experimenten. Voor Newtons theorie werkte dat eeuwenlang perfect. Maar bij extreme gevallen, zoals bij enorme zwaartekracht of gigantische snelheden klopte er iets niet. Daarom kwam Einstein met zijn algemene relativiteitstheorie. Een theorie die de extreme gevallen wél beschrijft. Maar die ook klopt met Newton voor de niet-extreme, dagelijkse situatie. Een goede nieuwe theorie is dus inclusief: hij neemt de oude theorie als het ware in zich op.

Maar hoe beschrijf je een theorie het best? Eerst deed men dat vooral met woorden. En met tekeningen. Maar er bleek een precieze taal te zijn. De taal van de wiskunde!

Dankzij de wiskunde zijn hele theorieën terug te brengen tot een paar regeltjes. De algemene relativiteitstheorie is te reduceren tot één formule. Eén regeltje, waar alles in zit. Maar dat regeltje is wel wat ingewikkelder dan het beroemde $E=mc^2$. U kunt hem trouwens vinden als muurformule op Museum Boerhaave, in deze stad waar Einstein graag was. Een verwante formule, opgesteld door Hendrik Lorentz, is te vinden langs het spoor, bij de Haagweg.⁴

Die wiskundige taal is zowel de zegen als de vloek van de natuurkunde.

Een vloek, omdat hij een drempel vormt. Voor al die mensen die wiskunde moeilijk en abstract vinden. En die daarom geen toegang krijgen tot de schoonheid van de natuurkunde.

4

En een zegen, omdat iets ongelooflijk ingewikkelds als de natuur terug te brengen blijkt tot een bondige wiskundige beschrijving: een natuurwet. En zo'n wet hangt niet af van plaats of tijd. Hij werkt even goed in Korea als in Amerika; even goed in de 17^e als in de 27^e eeuw. In zijn beroemde essay: "*The Unreasonable effectiveness of mathematics in the natural sciences*", bespreekt fysicus Eugene Wigner dit verbazingwekkende gegeven.⁵ Wiskunde die oorspronkelijk zonder betekenis leek, blijkt vaak een beschrijving van de natuur. Onredelijk? Of juist een hoogtepunt van de Rede?

Maar cruciaal blijft: het experiment wint altijd. Dat kan als enige falsificeren: aantonen dat een theorie onjuist is. Hoe knap die theorie ook moge zijn. Of zoals natuurkundige Richard Feynman zei:

*"It doesn't make any difference how beautiful your guess is, it doesn't make any difference how smart you are, who made the guess, or what his name is. If it disagrees with experiment, it's wrong. That's all there is to it."*⁶

Dat is de kern. En soms is dat pijnlijk.

Neem nou een van de grootste Duitsers ooit, Goethe. Hij bedacht een theorie over kleuren. Hij was er zo trots op dat hij aan het einde van zijn leven zei:

*"Over alles wat ik als dichter gepresteerd heb, beeld ik mij helemaal niks in. [...] Maar dat ik in mijn eeuw in de moeilijke wetenschap van de kleurenleer de enige ben, die het juiste weet, dat verschaft mij enig genoegen."*⁷

Hij zat er helemaal naast. De experimenten weerspreken zijn theorie. Gelukkig hebben we zijn gedichten nog. Bijvoorbeeld '*Natur und Kunst*' dat als muurgedicht te vinden is aan de Plantage in Leiden.⁸

De kracht van de directe toets door het experiment is de reden dat ik me aan de experimentele natuurkunde heb gewijd. Het doen van proeven stelt mij in staat om direct in gesprek te gaan met de natuur. Een bijzonder privilege!

De invloed van de natuurwetenschap op ons leven is enorm. Hoewel er helaas nog veel armoede is, leven veel wereldburgers in luxe vergeleken met 500 jaar geleden. De reden hiervoor is een ander fenomeen: de spiraal van wetenschap en technologie. Dankzij wetenschappelijke inzichten, worden uitvindingen gedaan. Die uitvindingen helpen de wetenschap weer vooruit, waardoor er meer kennis komt en nog meer uitvindingen worden gedaan. Enzovoort, enzovoort.

De eerste bestuurders van de Universiteit Leiden hadden dat goed in de gaten. Ze wisten topwetenschappers aan te trekken door twee dingen te bieden: geld en academische vrijheid. Zo werd Leiden een broedplaats voor vernieuwing. En daarmee een bron van welvaart.

Neem Christiaan Huygens. Die ontdekte hoe de lengte van een slinger de slingertijd bepaalt. Met die kennis ontwierp hij een betrouwbare slingerklok. Een klok die in elke huiskamer kon staan. Maar die het ook mogelijk maakte om preciezer te meten. Huygens slinger is als muurformule te vinden aan de Plaatsteeg.

Een recenter voorbeeld is de computer. Dankzij kennis van de quantummechanica snaptten we hoe we een transistor kon-

den maken van silicium. Dat was de basis voor de chip en de computer. Maar met die nieuwe computers konden we ook het silicium weer beter begrijpen. En nu bouwen we robots om nog betere chips mee te maken.

En wat dacht u van lasers? Ooit gezien als fascinerende maar nutteloze natuurkunde. Nu niet meer weg te denken uit bijvoorbeeld de bouw.

Nu ik heb verteld over de wetenschappelijke methode kunnen we verder gaan. Naar mijn vakgebied, de fysica van de gecondenseerde materie. Dat gaat over harde, vaste stoffen, zoals diamant, silicium of goud. En elektronen spelen hier de hoofdrol...

Alle materialen zijn opgebouwd uit atomen. Atomen hebben een positief geladen kern, die zelf weer bestaat uit protonen en neutronen. Rondom deze kern draaien kleinere, negatief geladen elektronen. Een beetje zoals planeten om de zon. Maar eigenlijk ook weer helemaal niet. Want waar Saturnus op een specifieke plek te vinden is, geldt dat niet voor het elektron. Dat zit eigenlijk overal tegelijk. Als een soort schil om de kern heen. Dat is gek. Hoe kan een deeltje overal zijn?

We komen nu bij de kern van de quantummechanica: het elektron is namelijk een deeltje en tegelijk óók een golf. En een golf zit niet op één plek, maar is over een gebied verspreid. Denk maar aan een golf in de zee. Je kunt niet wijzen en zeggen: Ah, precies hier zit de golf!

Elektronen worden beschreven door een zogeheten golfvergelijking. En daaruit volgt iets interessants: hoe meer je een elektron opsluit, hoe hoger zijn energie wordt.

Of positiever beschreven: als je een elektron meer ruimte geeft, heeft het een lagere energie. In de natuurkunde noemen we dat 'gunstiger'. Alle natuurkundige systemen zoeken namelijk de laagste energie op. Daarom valt een kogel naar beneden en niet naar boven.

Kortom hoe meer bewegingsvrijheid het elektron krijgt, hoe gunstiger! Ik kom daar nog op terug.

Alle eigenschappen van vaste stoffen kunnen worden verklaard door het gedrag van elektronen. Traditioneel delen we zulke stoffen in in drie groepen: isolatoren, halfgeleiders en metalen. In een isolator, zoals diamant, zitten de elektronen stevig op hun plekje. Zo stevig, dat ze niet in beweging kunnen worden gezet door een elektrische spanning. Ze geleiden daarom geen elektriciteit. Om dezelfde reden zijn ze doorzichtig: zichtbaar licht heeft te weinig energie om de elektronen los te maken. Licht gaat daarom ongestoord door de isolator heen.

Alhoewel: niet helemaal ongestoord. Het verandert van richting! Dit is de reden dat je zo'n rare knik ziet in een rietje dat in een glas water staat. Snellius heeft hier een formule voor bedacht. Die is te vinden aan de St. Jorissteeg. Maar was hij echt de eerste? Dat is niet zeker. Waarschijnlijk was de Arabische wetenschapper Ibn Sahl eerder en heeft Snellius de formule opnieuw ontdekt. Wellicht kan Bagdad worden opgesierd met een muurformule van Sahl? Of moeten wij Sahl toevoegen aan de Leidse muur? Ere wie ere toekomt ten slotte!

Naast isolatoren heb je de zogeheten halfgeleiders. De bekendste is silicium. In een halfgeleider zitten de elektronen ook vast, maar niet zo heel goed. Daardoor zijn ze makkelijk manipuleerbaar. En die manipuleerbaarheid ligt aan de basis van de computerchip. Er zitten zo'n vijf Nobelprijzen achter elke computer en smartphone! Hoewel geen van de winnaars Steve Jobs heette...

Tenslotte heb je de metalen: goud, zilver, koper, etcetera. In metalen zitten de elektronen zo los dat ze aan de wandel kunnen gaan. Daardoor kun je metalen gebruiken als elektrische stroomdraad.

Als we iets preciezer kijken, blijkt dat er een hele reeks plekjes beschikbaar is voor de elektronen. Deze plekjes noemen we toestanden. Ze hebben allemaal een net iets andere energie, van laag naar hoog. De elektronen vullen deze plekjes op. Met één voorwaarde: als een plekje bezet is, moeten ze naar een andere toestand, meestal met een hogere energie. U kunt zich dit voorstellen als een badkuip met water. Als we water toevoegen,

wordt het peil hoger. Het water kan niet anders. Maar energetisch gezien is het niet gunstig. Daarom wil het water het liefst de badkuip weer uitstromen. Het enige wat dat tegenhoudt is de rand van het bad, die een beetje uitsteekt boven het water-niveau.

En zo is het ook in een metaal. De waterspiegel in een metaal heet de Fermi-energie. Onder die energie zijn alle toestanden gevuld met elektronen. Daarboven zijn de toestanden leeg. De rand van de badkuip heet de vacuüm-energie. Dankzij die rand blijven de elektronen keurig in het metaal.

Het beeld van de badkuip werkt best aardig, maar is natuurlijk ook te simpel. Elk metaal is anders. En de toestanden waar de elektronen in zitten verschillen van materiaal tot materiaal.

Dat roept een vraag op: kunnen we ook meten in welke toestanden de elektronen precies zitten?

Dat kan! En wel door elektronen met licht uit hun plekjes te schieten en te meten welke energie en snelheid ze dan nog over hebben. Dat losschieten heet het foto-elektrisch effect.

Hoe moet u zich dat voorstellen? Daarvoor gaan we terug naar de badkuip. Stel, we laten een klein steentje vallen op het water. Er ontstaat dan wellicht een plonsje, maar het water spat niet hoog genoeg op om uit de kuip te komen. Geen succes. Nu pakken we een groter steentje.

Grotere plons, maar nog geen succes. Dus pakken we een flinke kei. Pas nu is de plons groot genoeg: er spat een waterdruppel over de rand.

Wat steentjes waren voor water, blijken lichtdeeltjes voor elektronen. Stel een lichtdeeltje heeft weinig energie, zoals bij zichtbaar licht. Dan kan het een elektron wel een beetje omhoog tillen - een plonsje maken - maar niet genoeg om over de rand te komen. Zulk licht doet dus niets. Maar licht met meer energie, zoals UV, maakt een grotere plons. Zulke lichtdeeltjes zijn als keien: krachtig genoeg om een elektron los te krijgen. Waarvoor we iets kunnen leren over de toestand waar het uit kwam. Want het elektron neemt die informatie mee naar buiten.⁹

Hiermee zijn we klaar om de volgende stap te maken, naar het onderzoek in mijn vakgroep. Die stap wil ik inleiden met twee vragen.

- Bestaan er alleen metalen, halfgeleiders en isolatoren?
- En moeten we het überhaupt doen met wat de natuur ons biedt?

Het antwoord op beide vragen is nee! En dat maakt mijn vakgebied zo fascinerend!

Een goed voorbeeld is grafeen. Als u met een potlood schrijft, laat u grafiet achter op het papier. Dat grafiet bestaat uit allemaal laagjes koolstofatomen. Laagjes die zwak aan elkaar vastzitten. Eén zo'n laagje, van precies één atoom dik, heet grafeen. Grafeen is doorzichtig én elektrisch geleidend. Een ongebruikelijke combinatie, zoals we net zagen. Maar het bijzonderste is dat de elektronen in grafeen zich gedragen alsof ze geen massa hebben. Alsof ze niets wegen. Heel vreemd. Want daardoor vertonen ze gedrag dat alleen kan worden begrepen met de relativiteitstheorie. En dat in een laagje potlood! Niet voor niets kregen grafeen-pioniers Novoselov en Geim de Nobelprijs.¹⁰

Maar grafiet is niet uniek. In de natuur vinden we veel meer gelaagde materialen. We noemen ze Van der Waals materialen, omdat de laagjes aan elkaar vastzitten met een vrij zwakke kracht, die is genoemd naar Nobelprijswinnaar J.D. van der Waals. Zijn muurformule staat aan de Fruinlaan.

Maar hiermee ontstaat ook een kans! Wat als we nu één laagje uit moedermateriaal A combineren met een laagje uit materiaal B, en dan wellicht een laagje uit materiaal C? Krijgen we dan een nieuw materiaal? Met nieuwe eigenschappen?

Ja, in principe wel! Dat is interessant! Want dat betekent dat we materialen kunnen bouwen die niet in de natuur voorkomen. Met bijna oneindige mogelijkheden tot variatie. Een beetje zoals je een spekkoeke opbouwt uit heel verschillende laagjes. Maar dan gaan die laagjes hier mengen tot een heel nieuwe koek. De hoop is dat het ooit volgens het volgende recept zal gaan:

Stel, iemand vraagt om een materiaal met bepaalde eigenschappen. We geven deze vraag dan door aan een computer. Die berekent vervolgens welke laagjes we op welke manier moeten stapelen om het gewenste materiaal te krijgen. En dan maken we het echt. Eigenschappen op bestelling. *Designer materials*.

Maar daar zijn we nog lang niet. Wat precies de eigenschappen worden, is nu namelijk nog moeilijk te voorspellen. Die hangen af van zowel de individuele laagjes als de interacties tussen de laagjes. En die kennen we nog niet goed genoeg. Kortom, dit vraagt om meer onderzoek!

De natuurkunde die we dan gaan tegenkomen is vaak verrassend. En niet altijd simpel. Dat kan ik het beste illustreren met een voorbeeld.

Stel we nemen twee laagjes grafeen en we plaatsen die recht op elkaar. Nu draaien we het bovenste laagje een klein beetje ten opzichte van het onderste laagje. Met een hoekje van 1,1 graad. Dan gebeurt er iets heel gek. Het materiaal wordt een supergeleider bij lage temperatuur. ¹¹ Dat wil zeggen dat er een elektrische stroom kan lopen zonder enig verlies. De weerstand wordt precies nul. Heel apart. Zeker omdat de supergeleiding weer verdwijnt als we de hoek tussen de lagen vergroten naar 2 graden.

Dit voorbeeld laat zien hoeveel rijkdom er verborgen zit in deze materialen: er zijn vele verrassingen mogelijk! *Nieuwe fysica, nieuwe eigenschappen, nieuwe materialen*. Die we hopelijk leren begrijpen en beheersen.

In ons lab maken en bestuderen we zulke materialen. We maken ze via het stampelen van laagjes op elkaar. Dat is een precies werkje dat goede apparatuur vergt. Soms doen we dat in Leiden, soms krijgen we materialen van elders. Sterker nog: een groot deel van ons onderzoek doen we samen met anderen. In Nederland, maar ook in Zwitserland, Spanje, en Amerika. Meer bewegingsvrijheid is namelijk gunstig voor de wetenschap. Net als voor het elektron.

Onze ambities zijn niet klein. We willen de nieuwe materialen op alle fronten begrijpen. We willen weten hoe de atomen precies gestapeld zijn. En hoe de stapeling de toestanden van de elektronen bepaalt. En daarmee de eigenschappen van het nieuwe materiaal.

Veel van onze experimenten doen we in een opstelling die we ESCHER hebben genoemd. Naar de graficus. De relatie met grafeen is niet toevallig.

ESCHER is een lage-energie elektronenmicroscop. ¹² En het is de sjoelbak uit de titel. Ik zal dat in stapjes uitleggen.

In ons instrument schieten we losse elektronen op een materiaal af en meten wat ervan terugkomt. En hoe het terugkomt. Hierdoor kunnen we een materiaal bekijken, zoals bij een lichtmicroscop. Maar dan beter. Want met elektronen kun je kleinere dingen zien dan met licht.

ESCHER is veelzijdig: door het apparaat anders in te stellen, kunnen we iets anders bestuderen: bijvoorbeeld hoe de atomen precies gestapeld zijn. Sterker nog, bij gedraaid dubbellaags grafeen kunnen we sinds kort de precieze hoek tussen de laagjes meten. Erg belangrijk als je precies bij 1,1 graad wilt zitten!

Met ESCHER kunnen we ook meten welke toestanden er precies zijn voor de elektronen in een materiaal. We meten die op twee manieren.

Ten eerste gebruiken we het foto-elektrisch effect. We schieten dus elektronen uit het materiaal met UV-licht en analyseren waar ze oorspronkelijk moeten hebben gezeten. Zulk werk is belangrijk en wordt door vele groepen in de wereld gedaan. Maar wij kunnen nog iets anders; iets unieks. Wij kunnen de toestanden meten waar helemaal geen elektronen in zitten. In de analogie van de badkuip: lege plekjes die hoger zitten dan de waterspiegel. Zelfs hoger dan de rand van het bad.

Hoe meten we die lege toestanden? Om dat goed te begrijpen, doen we een gedachtenexperiment.

Stelt u zich een sjoelbak voor die bedekt is met een laken vanaf de plek waar u de stenen loslaat. Door de bedekking kunt u de

gaten niet zien. U weet niet eens hoeveel het er zijn. Misschien maar drie. Of zes?

En nu vraagt iemand u: *Waar zitten de gaten in deze sjoelbak?* Welke manier zou u kiezen om hier achter te komen? Tip: u mag de stenen zo hard sjoelen als u wilt. Denk er even over na...

Wat u misschien doet is het volgende: u begint helemaal rechts en sjoelt daar een steen zo hard mogelijk rechtdoor. Komt de steen terug, dan was er op die plek blijkbaar geen gat. Komt hij niet terug dan zat er waarschijnlijk wel een gat. Vervolgens schuift u een beetje naar links en doet u het nog een keer. Enzovoort tot u helemaal bij de linkerkant bent aangekomen. Zo kunt u een soort kaart maken van waar de gleufjes zitten.

En zo doen wij het ook. Nou ja, ongeveer. Wij schieten elektronen naar het materiaal en kijken wat er terugkomt. En wij gaan niet van rechts naar links, maar van lage elektronenergieën naar hoge. Maar verder gaat het hetzelfde. We schieten elektronen van een bepaalde energie naar het materiaal. Komen ze massaal terug, dan was er geen plekje om in te gaan. Geen gleuf als het ware. Daarna verhogen we de energie en doen het nog eens. Etcetera.

En als bij een bepaalde energie de elektronen niet terugkomen, weten we dat er daar een leeg plekje was. Een toestand waar ze in kunnen gaan. Zo gaan we verder, tot we van elke energie weten of daar een toestand is of niet.

Toegegeven: een rare sjoelbak, maar het werkt. En anders dan bij een normale sjoelbak, is het aantal gaten niet per se vier. Sterker nog, in een simpel Van der Waals materiaal wordt het aantal toestanden bepaald door het aantal laagjes én de wisselwerking tussen die laagjes. Precies waar we naar op zoek waren! Neem grafeen. Dubbellaags grafeen heeft één zo'n lege toestand. Drielaags heeft er twee. Vierlaags drie, enzovoort. Om nog meer te leren over deze toestanden, hebben we een meetmethode uitgevonden die we ARRES hebben genoemd. Ik zal hier niet op details ingaan, maar dankzij ARRES kunnen we

de interacties tussen de laagjes nog beter bestuderen. Belangrijk voor ons werk richting nieuwe materialen.¹³

Toen u in uw hoofd aan het sjoelen was, dacht u wellicht: wat doen we met die sjoelstenen die zo vervelend blijven liggen voor de gaten. Die gaan niet door de gleufjes, maar komen ook niet terug. Mis je die dan niet? En geldt dat ook voor elektronen? Het antwoord is ja! Sommige elektronen verliezen hun snelheid in het materiaal, door zogeheten inelastische botsingen. Ze blijven dan gelukkig niet voor het gat hangen, zoals sjoelstenen, maar verdwijnen richting de waterspiegel van het materiaal.

Hoeveel zijn dat er? Hoe komen we daar achter? Daar hebben we een andere techniek voor ontwikkeld, genaamd eV-TEM.¹⁴ Hierbij kijken we niet naar reflectie - het terugkaatsen van elektronen - maar naar transmissie. We meten bij iedere energie welke elektronen ongeschonden dóór het materiaal heen gaan. In ons gedachtenexperiment is dit zoiets als de gesluijverde sjoelbak aan de achterkant openmaken en kijken hoeveel stenen er door de gaten heen schieten.

Als we weten wat er terugkaatst én wat er doorheen gaat, weten we natuurlijk ook wat er in het materiaal is blijven hangen. Zo kunnen we voor elke energie bepalen hoeveel elektronen inelastisch botsen.

Wat leren we hiervan? We leren over de fundamentele natuurkunde achter dit soort processen. Dat vinden wij interessant... :-)

Maar dat is niet alles. Het blijkt dat die kennis van belang is voor allerlei velden in de wetenschap en technologie!

Neem de computerchip-industrie. Daar werken ze aan een technologie die EUV-lithografie heet. Hiermee kunnen nog betere computers worden ontwikkeld. Bij EUV-lithografie spelen inelastische botsingen van elektronen een grote rol. Kennis hierover is dus onontbeerlijk.¹⁵

Ook in de levenswetenschappen zijn inelastische processen van groot belang. Veel onderzoek naar cellen en virussen wordt gedaan met elektronenmicroscopen. Maar er is een probleem: de

cellen gaan stuk terwijl je kijkt, door inelastisch botsende elektronen. Kennis hierover kan dus leiden tot betere oplossingen. Om een voorbeeld te geven: elektronen met heel lage energieën blijken vrijwel geen schade toe te brengen aan biologische preparaten. Met eV-TEM kun je daarom urenlang kijken naar DNA, zonder dat je het stuk schiet.

Ik heb u nu verteld over onze droom om geheel nieuwe materialen te ontwikkelen. Met eigenschappen die we van tevoren kunnen inprogrammeren. De vragen die daaraan zijn gekoppeld vormen de basis van ons onderzoek. Hiervoor hebben we een hele reeks technieken uitgevonden, met mooie afkortingen als ARRES, eV-TEM en ook: LEEP. *Made in Leiden*, zeg maar.

Maar ik wil u ook nog vertellen over een andere droom. Een droom die geïnspireerd is door het laatste wat ik besprak: het afbeelden van cellen, virussen en eiwitten. Wij werken aan een techniek waarmee we zulke objecten levend kunnen afbeelden. Nauwkeurig en zonder schade. Als dat lukt, kan het serieuze impact hebben op de biologie en levenswetenschappen...

Op dit moment kun je een biologisch systeem op twee manieren bekijken. Ten eerste met zichtbaar licht, in een microscoop. Het grootste voordeel hiervan is dat je kunt blijven kijken zonder dat je de levende cel kapot maakt. Maar er is ook een nadeel: je kunt niet preciezer kijken dan de golflengte van zichtbaar licht, zo'n 500 nanometer. Je ziet dus geen details.

De andere mogelijkheid heb ik al genoemd: de elektronenmicroscoop. Hiermee kun je de cel heel nauwkeurig bekijken, maar tegelijkertijd schiet je hem kapot!

Wij werken nu aan een methode die het beste van twee werelden combineert: het schadevrije van de lichtmicroscoop en de nauwkeurigheid van een elektronenmicroscoop.¹⁶ Zodat we een cel of eiwit in zijn natuurlijke omgeving kunnen volgen.

Hoe we dat willen doen? Nou, we gaan zo'n cel belichten met groen licht. Dat kan zonder schade. Achter de cel ontstaat dan een soort schaduw, in het zogeheten nabije veld. Nu komt de truc: op de plek van die schaduw plaatsen we een speciaal laagje dat licht omzet in elektronen. En die elektronen beelden we dan af met onze elektronencamera. Eigenlijk zien we zo de schaduw van de bewegende cel. Als een wajangpoppetje. Maar dan met een resolutie van vijf nanometer.

Klinkt simpel. Dat is het natuurlijk niet. We moeten wetenschappelijk en technologisch behoorlijke stappen zetten. Daarom doen we dit samen met groepen in Wenen en Praag. Gefinancierd door de EU.

Zo ziet u hoe spannend wetenschappelijk onderzoek kan zijn: het is moeilijk, maar als het lukt, kan het echt impact hebben. Het is een weg met diepe dalen en hoge pieken! Maar een mooie weg die ons langzaam maar zeker vooruit brengt.

Ter afsluiting wil ik graag nog een paar woorden wijden aan de universiteit. Het is al een paar keer teruggekomen: een elektron dat een grotere ruimte kan verkennen, heeft een lagere energie dan een elektron dat is opgesloten. Meer vrijheid is dus gunstig voor een elektron. Natuurlijk is dit een puur natuurkundige waarheid. Maar voor mij is dit ook een metafoor voor de relatie tussen kennis en vrijheid.

Wat is eigenlijk het doel van een universiteit? Wat is haar rol? Daar zijn vele antwoorden op. Laat ik een typisch bèta-antwoord geven. En van daaruit beredeneren waarom academische vrijheid een noodzakelijke voorwaarde is voor een succesvolle universiteit. Gisteren, vandaag en zeker ook morgen.

Een universiteit is heel plat gezegd een kennismachine. Een machine die bestaande kennis als brandstof gebruikt en door onderzoek, analyse en discussie nieuwe kennis toevoegt. En die de opgedane kennis verspreidt via goedopgeleide studenten en promovendi. Maar ook via wetenschapscommunicatie en ob-

jectieve toelichtingen in de media. Dat objectieve is belangrijk. Zodra een wetenschapper persoonlijke meningen gaat mengen met wetenschappelijke feiten, verliest de boodschap aan kracht. Of eigenlijk aan autoriteit.

Wat hebben we aan die kennismachine? Heel veel. Het feit dat wij gemiddeld ruim 80 worden in plaats van 40 is rechtstreeks aan de wetenschap te danken. Goede universiteiten brengen welvaart. En daarmee ook welzijn. Dat duurt even, maar het gebeurt. Landen die vooruit willen, investeren daarom in universiteiten.

Maar universiteiten signaleren ook, zoals bij klimaatverandering, of armoede. Kortom, hoe beter de kennismachine werkt, hoe beter het is voor een land en voor de wereld.

Hieruit volgt een logische, bijna wiskundige vraag: hoe optimaliseren we de kennismachine?

10 Wat is ervoor nodig om het genereren en delen van kennis maximaal werkend te krijgen? Volgens mij is daar maar één echt antwoord op. Vrijheid. Want die geeft de ruimte waarin kennis kan floreren. En die vrijheid komt in vele gedaantes.

Vrijheid van debat is de eerste gedaante. Door met elkaar te discussiëren, leren we. Want zo verkennen we andere ideeën dan die van onszelf alleen. En kunnen we onze gedachten aanscherpen. Optimaliseren. Belangrijk is dan wel dat we echt naar elkaar luisteren, in een neutrale omgeving.

Vrijheid van onderzoek is even belangrijk, de vrijheid om zelf je onderwerp te bepalen. In dictaturen is dat niet mogelijk, waardoor de universiteiten daar vaak achter gaan lopen. Maar zelfs in Nederland staat deze vrijheid soms onder druk. Niet direct vanuit de staat, maar vanuit de maatschappij. In Leiden hebben we de affaire Buikhuisen gehad, een hoogleraar criminologie die na het uitspreken van zijn oratie zo hard werd aangevallen door columnisten en activisten, dat hij zich terugtrok en een antiëenzaak begon. Een zwarte bladzijde in de geschiedenis van deze universiteit. En hopelijk een blijvende les voor ons allen.

Een minder triviale vorm van academische vrijheid is onderzoeksgeld. Geld geeft de academicus de ruimte om nieuwe onderzoeksrichtingen te verkennen en zo nieuwe kennis te verwerven. Essentieel derhalve. De staat en de EU voorzien onderzoekers van subsidies. Maar steeds meer worden de subsidiestromen gebruikt om de onderzoeksrichtingen zelf te sturen; vaak in een toegepaste richting. Hoewel soms verdedigbaar beperkt dit hoe dan ook de onderwerpkeuze, met als gevaar dat het echt vernieuwende onderzoek niet meer wordt gedaan. En dat kan gevolgen hebben. Einsteins relativiteitstheorie is uit pure nieuwsgierigheid geboren, zonder enig praktisch doel. Toch zou de navigatie van uw auto of telefoon niet werken zonder deze theorie.

Maar het gaat niet alleen om onderzoek. Om de kennismachine optimaal te laten draaien moeten ook de studenten zich vrij kunnen ontplooien. En dat werkt twee kanten op. Op de academie moeten ze welkom zijn zoals ze zijn; zich veilig en vrij voelen. Ongeacht hun herkomst, geaardheid, geloof, of wat dan ook.

Maar andersom moet de academie ze ook de kans bieden om los te komen van hun achtergrond. Om de vrijheid te voelen om ideeën in twijfel te trekken. Ook als die in steen gebeiteld lijken. Dat kan confronterend zijn.

Een natuurkundestudent die in een letterlijke Schepping gelooft, krijgt hier college over de Oerknal. Ook als de student - christen, moslim, Jood of andersgelovig - dit als schokkend ervaart. In deze zin moet de universiteit geen veilige plek willen zijn.

Het is deze paradox, tussen een veilige persoonlijke omgeving aan de ene kant en confronterende informatie en debatten aan de andere kant, die veel universiteiten momenteel bezighoudt. In Nederland, maar zeker ook in de VS en Engeland. Maar zoals elke paradox is ook dit een schijntegenstelling. Als we willen dat de universiteit optimaal functioneert, is vrijheid van informatie, hoe confronterend ook, essentieel.

Verrassend genoeg is er sinds kort een extra barrière voor studenten. En dat is taal. Zo'n 150 jaar na de afschaffing van het Latijn als voertaal zijn steeds meer Bachelor-studies in Nederland in het Engels. De meeste Nederlandse eerstejaars hebben echter serieuze moeite met academisch Engels. Het Engels kost energie en beperkt de denkbaarheid in hun hoofd. Hierdoor gaat het leerproces langzamer dan nodig. En haken er studenten af die het anders wel hadden gered. Ik vind dat niet verdedigbaar. Ik ben dan ook blij dat onze natuurkunde-opleiding begint in het Nederlands.

Maar ik ben ook blij dat we in de Master overschakelen op Engels. Want de Master introduceert de student in het wereldwijde academisch onderzoek, waarvan Engels de voertaal is. In dit geval maximaliseren we de denkrimte van de student dus juist door over te schakelen op Engels.

Kortom, als we de universiteit puur als een kennismachine beschouwen - een machine die we willen optimaliseren omdat hij welvaart en welzijn oplevert - blijkt vrijheid het sleutelingredient. Bewegingsvrijheid is gunstig voor kennis, net als voor het elektron.

Ik vind dat een fascinerende uitkomst. Zelfs als je er púúr zakelijk naar kijkt, blijkt iets moois als vrijheid een noodzakelijke voorwaarde. Want vrijheid is natuurlijk veel meer dan een knop voor optimalisatie. Het is ook een ideaal. Een ideaal waar de Oekraïners momenteel voor vechten.

De Leidse universiteit noemt zich een Bolwerk van de vrijheid. Dat gaat terug op zijn stichter, Willem van Oranje, die de universiteit omschreef als een '*Vast steunsel ende onderhoudt der vrijheid*'.¹⁷ Dat is geen wassen neus. Het hoort bij ons DNA. Dit werd op indrukwekkende wijze bevestigd tijdens de Tweede Wereldoorlog, toen hoogleraren als Barge, Telders, Van Holk en Cleveringa durfden te protesteren tegen onvrijheid. En met name tegen de antisemitische maatregelen van de bezetter tegen Joodse academici.

De Leidse hang naar vrijheid staat achter mij verbeeld in glas-in-lood. Op twee cruciale momenten die spiegelbeeldig zijn

neergezet: de 80-jarige oorlog met Willem van Oranje en de Tweede Wereldoorlog met Cleveringa. Ik ben er elke keer van onder de indruk.

Ik vind het dan ook een grote eer om als hoogleraar aan deze universiteit verbonden te zijn.

Ten slotte, wil ik allen die aan de totstandkoming van mijn benoeming hebben bijgedragen bedanken. In het bijzonder degenen die mij hebben geïnspireerd en uitgedaagd op de weg hier naartoe. En mij daarbij de nodige vrijheid hebben gegeven.

In chronologische volgorde:

Mijn lagere-schoolleraar Albert Velthuis en mijn natuurkundeleraar Dr. Simon Goverse - ik vind het heel bijzonder dat ze hier allebei zijn - mijn scheikundeleraar Dr. Mark Ferrari, mijn afstudeerbegeleider Prof. Teun Klapwijk, mijn promotor Prof. Ronald Griessen, alsmede de hoogleraren Bart van Wees, Ben Feringa en Christian Schönenberger.

Hier in Leiden: de hoogleraren Jan van Ruitenbeek, Eric Eliel en Jan Aarts.

Een speciaal dankwoord is voor Prof. Ruud Tromp, die mij op het pad van het LEEM onderzoek heeft gebracht en met wie ik al jaren samenwerk.

Maar mijn onderzoek zou nooit van de grond zijn gekomen zonder de leden van mijn vakgroep. Net als ik hebben zij pieken en dalen gekend, maar ieder heeft een eigen bouwsteen geplaatst in het bouwwerk van natuurkundige kennis. Heel veel dank!

Mijn dank gaat ook uit naar alle technici die hebben bijgedragen aan mijn onderzoek.

Ook de studenten die ik college heb mogen geven of heb mogen begeleiden bij hun afstudeeronderzoek, wil ik bedanken. Het is een voorrecht om in een omgeving te werken met zoveel enthousiaste jonge mensen. De studenten van de stichting Rino wil ik speciaal in het zonnetje zetten. Hun manier van wetenschapscommunicatie bedrijven is even uniek als geweldig.

Ten slotte, bedank ik mijn belangrijkste leermeesters, mijn ouders, die mij ongelofelijk veel liefde en wijsheid hebben meegegeven. Ook gaat mijn dank uit naar mijn lievelingsbroer Anne Jeroen en mijn extra zus Mara.

A special word of gratitude goes to the American families that opened their homes and hearts to me. Thank you!

Maar zonder mijn vrouw Marèse en onze mooie zonen Maarten en Edzard was het allemaal zoveel moeizamer geweest. En veel minder leuk. Fijn dat wij er voor elkaar zijn!

Laat ik daarom afsluiten met een aangepast citaat van de bekendste schrijver van de Klassieke Oudheid:

*“Al wist ik de verborgenheden, en al de wetenschap;
als ik de liefde niet had, baatte het mij niets.”¹⁸*

Ik heb gezegd.

Eindnoten

- 1 <https://nl.wikipedia.org/wiki/Sjoelen>
- 2 <https://nl.wikipedia.org/wiki/Elektron>
- 3 Dit experiment wordt vaak toegeschreven aan Galileo Galileï, maar die heeft het naar alle waarschijnlijkheid nooit uitgevoerd. Er zijn echter sterke aanwijzingen dat de Oostromein (Byzantijn) Johannes Philiponos (Alexandrië, rond 490-575) de allereerste was die deze proef heeft gedaan.
- 4 Voor een overzicht van de Leidse muurformules, zie www.muurformules.nl De website is ook beschikbaar in het Engels en Duits.
- 5 Eugene Wigner, “The Unreasonable Effectiveness of Mathematics in the Natural Sciences,” *Communications in Pure and Applied Mathematics*, vol. 13, No. I (1960)
- 6 Richard Feynman over de wetenschappelijke methode (1964). Het college is onderdeel van de beroemde ‘Feynman Lectures on Physics’, gegeven aan CalTech (1961-1964) en later uitgegeven in boekvorm.
- 7 “Auf alles, was ich als Poet geleistet habe, bilde ich mir gar nichts ein. [...] Daß ich aber in meinem Jahrhundert in der schwierigen Wissenschaft der Farbenlehre der einzige bin, der das Rechte weiß, darauf tue ich mir etwas zugute [...].“ Johann Wolfgang von Goethe tegen Johann Peter Eckermann.
- 8 Voor een overzicht van de Leidse muurgedichten, zie www.muurgedichten.nl
- 9 Voor zijn verklaring van het foto-elektrisch effect heeft Albert Einstein in 1921 de Nobelprijs voor de natuurkunde gekregen. Vreemd genoeg niet voor zijn relativiteitstheorie die destijds als té revolutionair werd beschouwd.
- 10 Nobelprijs voor de natuurkunde 2010: Konstantin Novoselov en Andre Geim.
- 11 Unconventional superconductivity in magic-angle graphene superlattices, Yuan Cao, Valla Fatemi, Shiang Fang, Kenji Watanabe, Takashi Taniguchi, Efthimios Kaxiras, Raymond C. Ashoori, P. Jarillo-Herrero, *Nature* **556**, 43-50 (2018)
- 12 S. M. Schramm, J. Kautz, A. Berghaus, O. Schaff, R. M. Tromp, S.J. van der Molen, “Low-energy electron microscopy and spectroscopy with ESCHER: Status and prospects”, *IBM J. Res. & Dev.* **55** (4), p1. Zie ook: E. Bauer, “Low energy electron microscopy”, *Rep. Prog. Phys.*, **57** (9), 895–938 (1994) en R. M. Tromp, “Low-energy electron microscopy”, *IBM J. Res. & Dev.* **44** (4), 503–516 (2000)
- 13 J. Jobst, J. Kautz, D. Geelen, R.M. Tromp, S.J. van der Molen, “Nanoscale measurements of unoccupied band dispersion in few-layer graphene”, *Nature Communications* **6**, 8926 (2015); Johannes Jobst, Alexander J.H. van der Torren, Eugene E. Krasovskii, Jesse Balgley, Cory R. Dean, Rudolf M. Tromp, Sense Jan van der Molen, “Quantifying electronic band interactions in van der Waals materials using angle-resolved reflected- electron spectroscopy”, *Nature Communications* **7**, 13621 (2016)
- 14 D. Geelen, J. Jobst, E.E. Krasovskii, S.J. van der Molen & R.M. Tromp, “Nonuniversal transverse electron mean free path through few-layer graphene”, *Physical Review Letters* **123**(8): 086802 (2019)
- 15 A. Thete, D. Geelen, S.J. van der Molen & R.M. Tromp, “Charge catastrophe and dielectric breakdown during exposure of organic thin films to low-energy electron radiation”, *Physical Review Letters* **119** (26): 266803 (2017); I. Bespalov, Y. Zhang, J. Haitjema, R.M. Tromp, S.J. van der Molen, A.M. Brouwer, J. Jobst. & S. Castellanos, “The key role of very-low-energy-electrons in tin-based molecular resists for extreme ultraviolet nanolithography”, *ACS Applied Materials and Interfaces* **12**(8): 9881 (2020)
- 16 Raphaël Marchand, Radek Šachl, Martin Kalbáč, Martin Hof, Rudolf Tromp, Mariana Amaro, Sense J. van der Molen, Thomas Juffmann, “Optical Near-Field Electron Microscopy”, *Physical Review Applied* **16** (1), (2021)
- 17 Christiaan Weijts, “‘Praesidium Libertatis’ of andersom?”, Mare, 24 november 2005
- 18 Eerste brief van Paulus aan de Korinthiërs, hoofdstuk 13, vers 2, Bijbel (Statenvertaling; ingekort)

PROF.DR.IR. SENSE JAN VAN DER MOLEN



Sense Jan van der Molen is sinds 2007 verbonden aan het Leids Instituut voor Onderzoek in de Natuurkunde (LION). Op 1 juli 2018 werd hij benoemd tot hoogleraar Fysica van de gecondenseerde materie aan de Universiteit Leiden. Na een studie technische natuurkunde in Groningen deed Van der Molen zijn promotie bij prof. R. Griessen aan de VU. Hij deed daar onderzoek aan zogeheten schakelbare spiegels. Na zijn promotie werkte hij samen met prof. B.J. van Wees en prof. B.L. Feringa (Nobelprijs Chemie 2016) en, in Bazel, met prof. C. Schönberger. Zijn voornaamste onderzoekslijn was elektrische geleiding door moleculen. Deze lijn zette hij voort toen hij zijn eigen groep startte in Leiden. Sinds 2010 maakt hij voor zijn onderzoek gebruik van lage-energie elektronenmicroscopie (LEEM), mede dankzij twee NWO subsidies ('Groot' en 'Vidi'). Met diverse meetmethodes, waarvan er enkele in zijn groep zijn ontwikkeld, onderzoekt hij moleculaire systemen en atomaire lagen. Een belangrijk focuspunt zijn kunstmatige Van der Waals-materialen: nieuwe materialen die bestaan uit atomaire dunne laagjes die op elkaar kunnen worden 'gestempeld'. Sinds 2021 werkt Van der Molen ook aan een nieuwe vorm van schadevrije microscopie voor kwetsbaar, biologisch weefsel, samen met collega's in Wenen en Praag binnen het EU project 'ONEM'.

Van der Molen houdt zich actief bezig met wetenschapscommunicatie. Samen met prof. Ivo van Vulpen en Stichting TEGEN-BEELD heeft hij acht muurformules gerealiseerd in de stad Leiden. Inmiddels is het idee overgenomen door Utrecht, Praag en Wenen. Zie www.muurformules.nl



Universiteit
Leiden