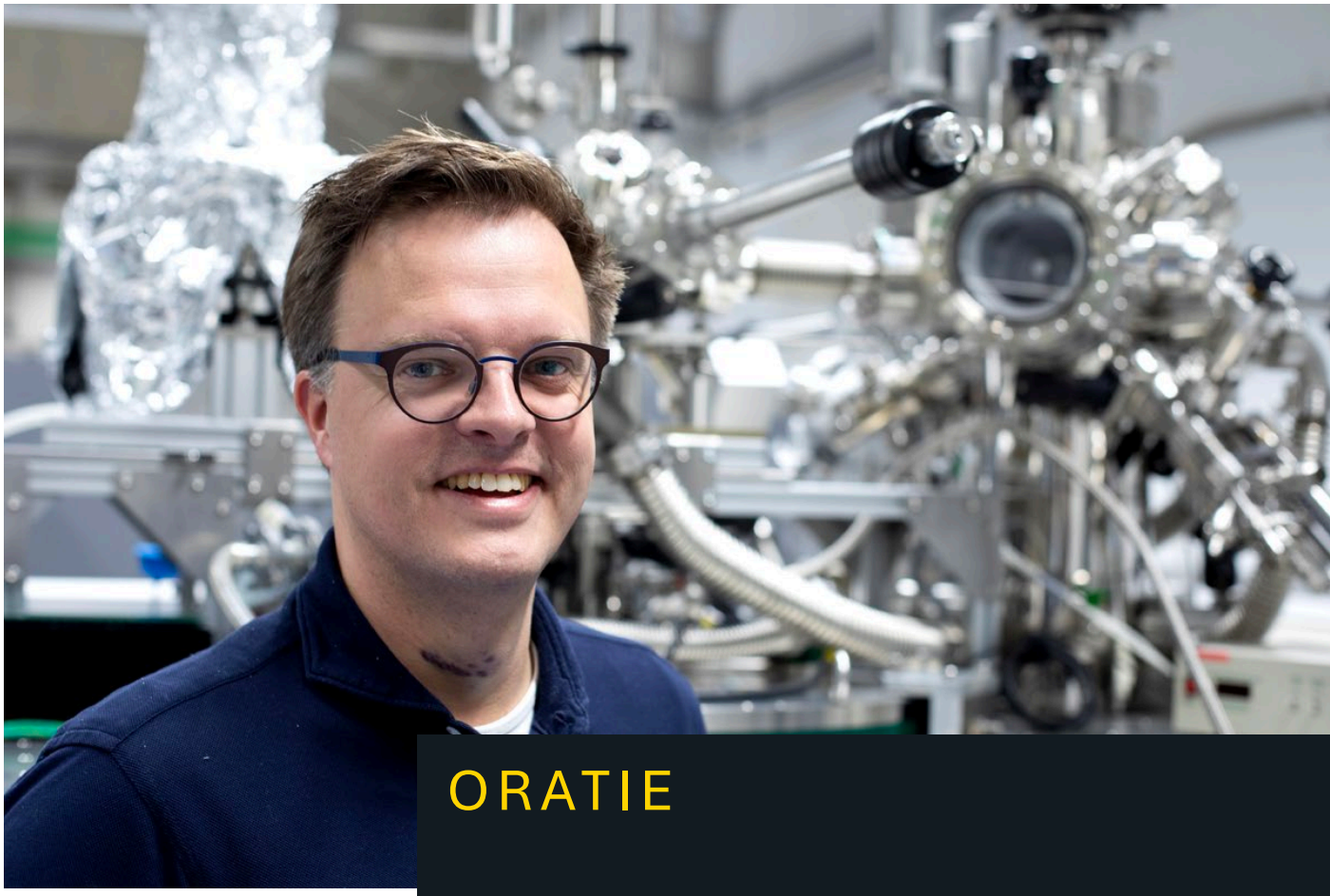
Universiteit Utrecht

Sharing science,
shaping tomorrow



ORATIE

Door het oog van de naald

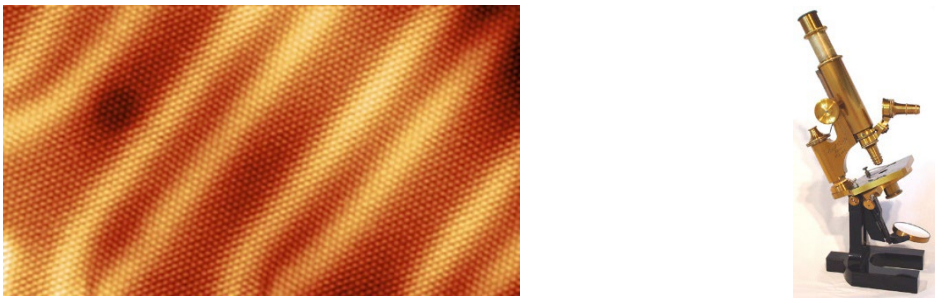
Prof. dr. Ingmar Swart

28 mei 2025

Dank uw wel mevrouw de rector. Wat een uniek moment om vanaf hier de zaal in te kijken. Welkom allemaal, ook de mensen die eventueel online kijken. Heel fijn dat jullie er zijn!

De komende drie kwartier mag ik iets doen wat ik heel leuk vind: op m'n praatstoel gaan zitten en ononderbroken vertellen over een van de dingen die ik het liefste doe, namelijk over experimenteel onderzoek naar zogenaamde kwantummaterialen.

De stoel waarop u zit, de lucht die u inademt, alles is gemaakt van atomen, inclusief wijzelf. Als je ver genoeg inzoomt op goud, dan krijg je een afbeelding zoals te zien in figuur 1. Elk geel cirkeltje is een enkel goud atoom. Jullie weten allemaal dat atomen klein zijn. Dus hoe kun je zoiets kleins als een atoom zichtbaar maken? Antwoord: met een microscoop.

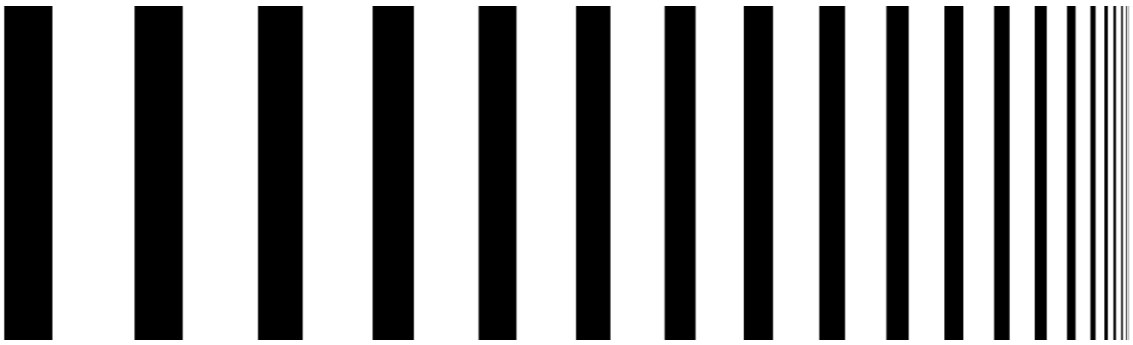


Figuur 1. Links: Een afbeelding van een oppervlak van goud. Elke cirkel komt overeen met een goud atoom. Rechts: een optische microscoop van Carl Zeiss.

Velen van u hebben tijdens biologielessen op de middelbare school – al dan niet al wat langer geleden – experimenten gedaan met een optische microscoop, zoals rechts afgebeeld in figuur 1. Daarmee kunt u prachtige gedetailleerde plaatjes maken van bijvoorbeeld plantencellen. Cellen zijn klein. Maar als we atomen willen zien, moeten we nog eens 50,000 keer verder inzoomen. Dat is met optische microscopen niet mogelijk.

Dus welke andere manieren zijn er om naar kleine dingen te kijken? En daarbij: is 'kijken' eigenlijk wel de beste optie? Het antwoord op die vraag is natuurlijk 'nee', want anders had ik het niet zo geformuleerd....

Om het idee te illustreren, wil ik gebruik maken van het volgende voorbeeld. Stelt u zich een ribbelpatroon voor, zoals in figuur 2. De afstand tussen de zwarte en witte lijnen wordt steeds kleiner naarmate je verder naar rechts gaat. Een logische vraag is dan: Wat is de kleinste afstand tussen twee zwarte lijnen zodat we ze nog kunnen onderscheiden als losse lijnen? Het antwoord is ongeveer 0.1 mm, de dikte van een menselijke haar.



Figuur 2. Een ribbelpatroon waar van links naar rechts de afstand tussen de zwarte lijnen steeds kleiner wordt.

Zo'n ribbelpatroon zou u ook met uw vingers kunnen aftasten. Als u met uw vingers over de stoel gaat waarop u nu zit, zult u voelen dat de zitting niet geheel vlak is. U voelt putjes en hobbeltjes. Het blijkt nu dat mensen met hun vingers in staat zijn om losse ribbels te voelen als de afstand tussen lijntjes 300x kleiner is dan een menselijke haar. Met andere woorden: met je vingers kun je veel kleinere dingen voelen dan dat je met je blote oog kunt zien. En wat helemaal verbazingwekkend is: de ribbels mogen ook nog eens 10.000x minder dik zijn dan een menselijke haar.

Dus kijken is niet de enige manier om een beeld te vormen van de wereld. Dat kan ook met voelen. Het meest bekende voorbeeld is waarschijnlijk het brailleschrift: iemand beweegt zijn of haar hand van links naar rechts over het papier en leest de tekst via de bobbelpatronen. Eigenlijk heel vergelijkbaar met hoe onze ogen van links naar rechts bewegen en de letters registreren. Dat beeld van een vinger die van links naar rechts over een oppervlak beweegt, beschrijft al heel aardig hoe onze microscoop werkt.

Maar ik wil graag iets verder de diepte in gaan. Je zou kunnen zeggen dat wereld van atomen en moleculen grotendeels verborgen is, simpelweg omdat atomen en moleculen zo klein zijn dat we ze niet kunnen zien. In verborgen werelden ontdekken we vaak nieuwe dingen, dat maakt het ook zo leuk. Toen Europese ontdekkingsreizigers in de 15de en 16de eeuw aankwamen in America en Australië, troffen ze daar vaak onbekende, exotische dieren aan. Zo is het ook met de wereld van atomen en moleculen: we ontdekken daar dingen die we niet kennen uit onze macroscopische wereld. Een voorbeeld is dat wanneer een elektriciteitskabel gebroken is, en de uiteinden elkaar niet raken (zie figuur 3). Er kan dan geen stroom lopen en je apparaat doet het niet. De reden daarvoor is dat de elektronen waaruit stroom bestaat, niet meer van de ene kant van de draad naar de andere kant kunnen. Maar op de schaal van atomen en moleculen kan dit wel! Dit wil ik uitleggen.

Figuur 3. Door een gebroken elektriciteitskabel kan geen stroom lopen (links) en knikkers kunnen niet spontaan van de ene put naar de ander springen (rechts).

Elektronen beschouwen we vaak als een deeltje, net als deze knikkers. In deze analogie, kunt u elektronen in een stroomdraad vergelijken met knikkers in een put. Twee stroomdraden die elkaar niet raken zijn dan te vergelijken met twee putten die dicht bij elkaar komen (figuur 3, rechts). Knikkers uit de ene put kunnen niet spontaan 'overspringen' naar een andere put: er loopt geen stroom.

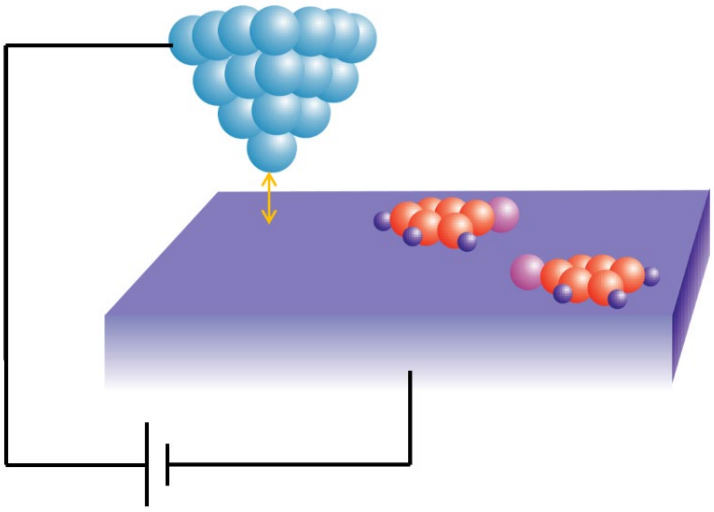
Maar de wereld van atomen en moleculen wordt beschreven door een natuurkundige theorie die we de kwantummechanica noemen. Een exotische ontdekking uit de kwantummechanica –

Figuur 4. In de kwantummechanica kun je een elektron beschouwen als een deeltje (rood, links), maar ook als een golf (blauw, rechts). Een golf kan door een barrière heen tunnelen.

denk nog even aan de dieren die Europese ontdekkingsreizigers tegenkwamen - is dat een elektron kan worden beschouwd als een deeltje maar ook als een golf. Nu zult u misschien denken: nou en? Een van de gevolgen van deze zogenoemde golf-deeltje dualiteit zal ik hier kort illustreren, in 1 dimensie. Stelt u zich weer een elektron voor in een put. De rand van de put stelt het einde van de draad voor. We beschrijven het elektron eerst als een deeltje (rode cirkel in figuur 4). Als je dit elektron een klein zetje geeft, dan kan het een klein stukje de heuvel op, maar als de zet niet hard genoeg is, zal het elektron nooit in de naburige put terecht komen. Kortom: er loopt geen stroom.

Maar als we het elektron beschouwen als een golf, gebeurt er iets heel anders (figuur 4, rechts). De golf botst ook tegen de rand, net als een deeltje, maar in tegenstelling tot de deeltjesbeschrijving kan de golf een stukje doordringen in de rand. Als de afstand tussen twee putten, tussen twee draden, voldoende klein is, is de golf nog niet uitgedoofd als deze de tweede put bereikt. Op dat moment kan de golf verder. In andere woorden, als de afstand tussen de twee stroomdraden klein genoeg is, gaan het elektron door de rand heen, en zal er toch een stroom lopen, ondanks het feit dat de draden elkaar niet raken. Dit effect staat bekend als 'tunnelen'.

Je kunt dit tunnel effect gebruiken om een tast microscoop mee te maken: je hebt een atomair scherpe naald – een van de uiteinden van de gebroken stroomdraad, dat elektrisch verbonden is met een oppervlak, dat u kunt beschouwen als het andere uiteinde (figuur 5). Als je die naald steeds dichter bij een oppervlak brengt, zal er op een gegeven moment op grond van het kwantummechanische tunnel effect een stroompje gaan lopen. Hoe dichtbij is dichtbij dan? Stelt u zich de Eiffeltoren voor. Dat is onze naald. Met boven de Eiffeltoren het oppervlak dat we willen bestuderen. In deze vergelijking zou de afstand tussen de Eiffeltoren en het oppervlak, een haardikte zijn. Kortom: als we nu één haar op die Eiffeltoren leggen, dan zouden we het oppervlak aanraken.



Figuur 5. In een scanning tunneling microscoop, loopt er vanwege het tunnel effect een stroom tussen een atomair scherpe naald en een oppervlak. Hiermee kan het oppervlak afgetast worden.

Door de naald nu over het oppervlak te bewegen en de hoogte van de naald aan te passen zodat de stroom constant blijft, kunnen afbeeldingen van oppervlakken worden gemaakt. Als de naald over een molecuul heen gaat, wordt de afstand kleiner. Daardoor neemt de stroom toe. Het regelmechanisme trekt de naald terug, en de naald scant verder, etc. We kijken als het ware door het oog van de naald naar de wereld van atomen.

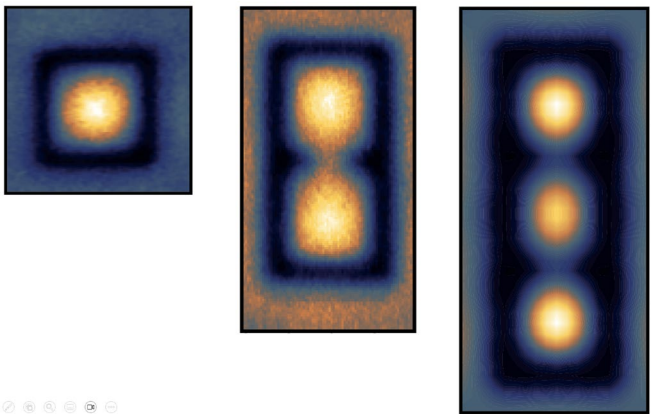
Dit type microscoop wordt een scanning tunneling microscoop genoemd, afgekort STM. De scanning tunneling microscopen die wij gebruiken zijn te groot om mee te nemen naar het Akademiegebouw. De opstellingen zijn zo'n 2 bij 1 m, en tot wel 4,5 meter hoog. Als u wilt, bent u later van harte welkom om een keer in ons laboratorium te komen kijken. Maar wat wel kan, is vanuit hier verbinding maken met een van de microscopen en live 'meekijken' met een experiment. En het is natuurlijk altijd een risico om een live experiment te doen, maar mijn leerstoel is 'experimental' quantum materials, dus we gaan het gewoon proberen!

[Uitleggen wat mensen zien]

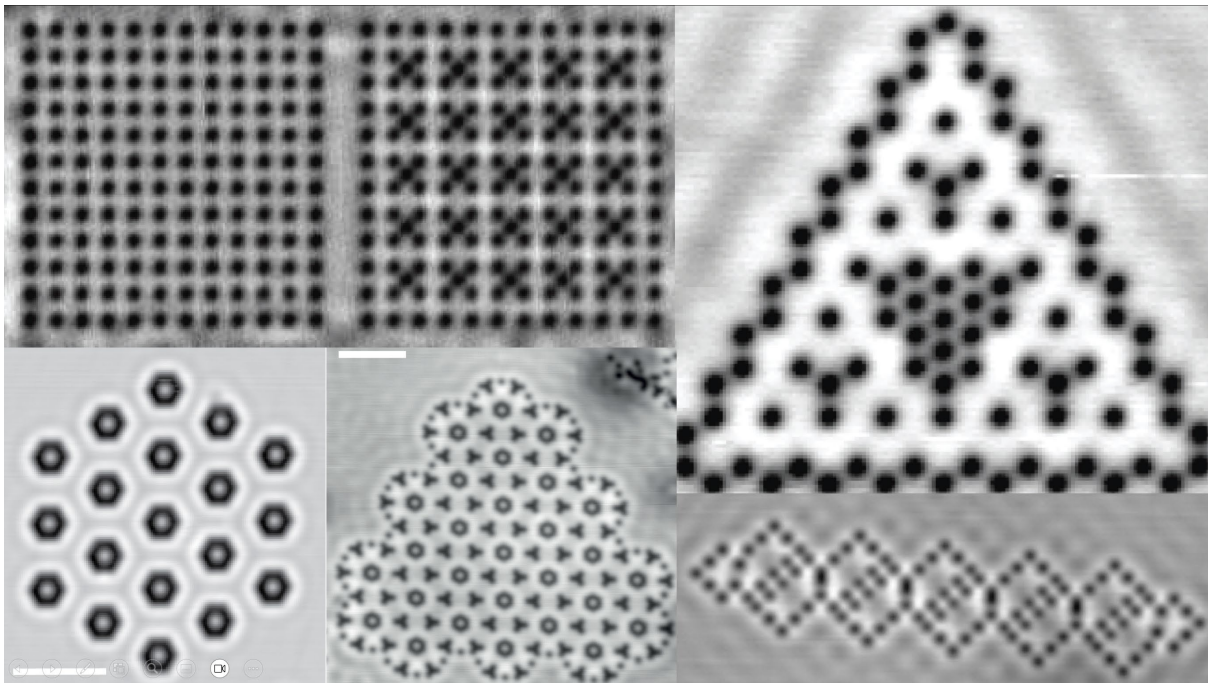
Naast prachtige plaatjes maken, kun je nog iets unieks doen met een STM: je kunt atomen en moleculen heen en weer schuiven over een oppervlak. Dat werkt nagenoeg hetzelfde als wanneer u met uw vinger iets over een tafeloppervlak verschuift. Je brengt de naald simpelweg iets dichter naar het oppervlak toe, en beweegt deze dan zijwaarts. En je kunt dit heel precies en gecontroleerd doen. Om te illustreren hoe precies, wil ik graag een zogenaamd stop-motion filmpje laten zien dat gemaakt is door mijn collega's van IBM.

Dit filmpje, te zien op YouTube, is gemaakt door CO moleculen op een bepaalde manier op het oppervlak te zetten, plaatje maken, moleculen verplaatsen, nieuw plaatje maken, etc. Door al die plaatjes achter elkaar te zetten, krijg je dit filmpje. Dit is natuurlijk prachtig. Het staat in het Guiness Book of World Records, heeft de voorpagina van de NYT gehaald, en heeft de makers misschien een leuke bonus opgeleverd, wat kunnen we hier wetenschappelijk nu mee?

Wij zijn begonnen met het maken van heel simpele structuren, zoals een vierkantje (zie figuur 6). De CO moleculen zitten hier zo dicht op elkaar dat het een soort hek vormt. Binnenin dit vierkante hek is een elektron opgesloten. Vergelijkbaar met hoe een elektron opgesloten zit in een waterstof atoom. Dat bestaat immers ook uit een atoomkern die een elektron opsluit. Dit vierkantje met opgesloten elektron gedraagt zich dan ook alsof het een atoom is. En dan kun je twee, of drie van die hekjes aan elkaar vastmaken (figuur 4). Op die manier kun je dus als het ware atoom-voor-atoom materialen maken en vervolgens kijken welke eigenschappen er ontstaan, en hoe deze afhangen van hoe je de atomen aan elkaar vastmaakt. In een lijntje, onder een hoek, etc.



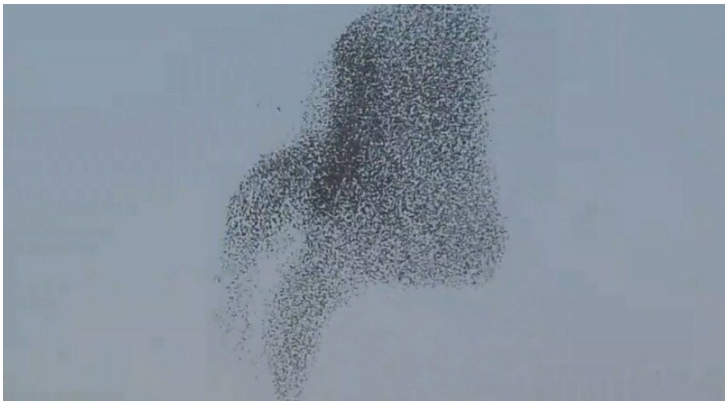
Figuur 6. Door CO moleculen dicht naast elkaar te zetten (zwarte rand), kunnen elektronen (geel) worden opgesloten. Het vierkantje met opgeslagen elektronen (links) gedraagt zich als atoom. Door zulke 'artificiële atomen' aan elkaar te koppelen, kunnen artificiële moleculen (midden en rechts) gemaakt worden



Figuur 7. Verschillende ‘artificiële materialen’ die we in Utrecht gemaakt hebben.

In figuur 7 laat ik een aantal voorbeelden zien van modelmaterialen die we in ons lab gemaakt hebben, variërend van een simpel vierkant van vierkantjes tot meer exotische structuren. Op die manier hebben we bestudeerd hoe de eigenschappen van materialen afhangen van hun structuur.

Ik heb nu iets verteld over hoe je atomen zichtbaar kunt maken en hoe je materialen atoom-voor-atoom kunt maken en bestuderen. Maar mijn leerstoel gaat over ‘kwantummaterialen’. Om duidelijk te maken wat dat zijn, ga ik gebruik maken van een analogie. In figuur 8 ziet u een zwerm spreeuwen. Een prachtig natuurschouwspel. De wolk verandert continue van vorm, dijt uit, krimpt weer, en beweegt telkens in een andere richting. Als je dit wilt begrijpen, dan kun je wel een spreeuw uit de wolk plukken en vaststellen dat die spreeuw twee vleugels en twee poten heeft, maar dat vertelt je niks over de eigenschappen van de wolk. Om die te begrijpen, moet je weten hoe spreeuwen op elkaar reageren. Zo is het ook met kwantummaterialen, maar dan met elektronen in de rol van spreeuwen.



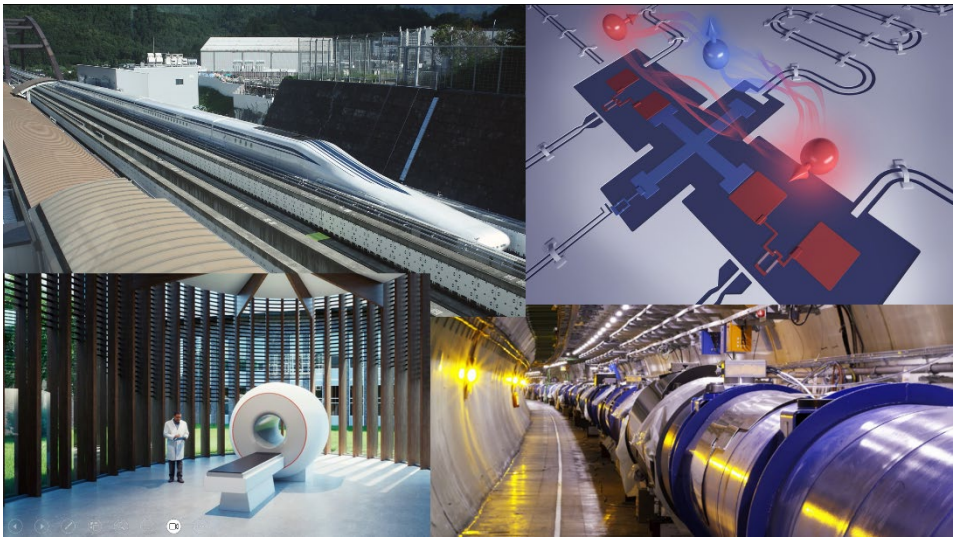
Figuur 8. Een zwerm spreeuwen.

En dan zult u zich afvragen waarom zijn die interacties tussen elektronen dan zo belangrijk? Nou, materialen waar elektronen zich als een collectief gaan gedragen, vertonen vaak spectaculaire, en mogelijk ook nuttige eigenschappen. Het bekendste voorbeeld is supergeleiding. Als een materiaal supergeleidend is, heeft het een weerstand van nul Ohm: je kunt elektriciteit zonder verlies van A naar B transporteren. Een andere eigenschap van supergeleiders is dat ze alle magneetvelden buitensluiten. Bepaalde supergeleiders vertonen dan een fenomeen dat 'Quantum Locking' heet. Dat is iets dat ik graag wil demonstreren via een experiment. Mijn leerstoel is tenslotte 'experimental quantum materials', oftewel proefjes doen met dit soort materialen. U kunt zo via de camera volgen wat er gebeurt, maar vanwege IT redenen is er een vertraging van een seconde of 8 in het beeld.

Figuur 9. Bepaalde supergeleiders vertonen 'quantum locking', waardoor ze op een bepaalde hoogte boven of onder een magneetbaan zweven.

In figuur 9 ziet u een magneetbaan en een schijfje waar een supergeleider in zit. Dit schijfje werd ondergedompeld in vloeibaar stikstof. Daarmee is het afgekoeld tot een temperatuur van ongeveer 195 graden Celsius onder nul. Als het schijfje zo koud is, is het supergeleidend geworden. Als je de supergeleider boven de magneetbaan brengt, dan blijft het zweven. De supergeleider sluit zich als het ware op op een bepaalde afstand van de magneetbaan. Als je het schijfje een zetje geeft, zweeft de supergeleider op de vastgestelde hoogte over de magneetbaan. Dat 'quantum locking' meer is dan 'simpel' zweven kan je laten zien door de baan om te draaien en de schijf onder de baan te plaatsen. In dat geval, zweeft de schijf onder de baan, en kan het deze rondjes draaien aan de onderkant.

De hoeveelheid supergeleidend materiaal in het schijfje in figuur 9 is zeer beperkt. Als we een schijfje zouden hebben met een diameter van 8 cm, en een dikte van 2 mm dan kan dat schijfje zo'n 1000 kg aan gewicht dragen! Ongelofelijk! Op dit moment wordt er in Japan gebouwd aan een trein, en bijbehorend spoor, die gebruik maken van dit effect, de Superconducting Maglev, zie figuur 10. Deze trein, die snelheden tot 600 km/h bereikt, zou in 2034 in gebruik moeten worden genomen. Supergeleiders worden ook gebruikt in MRI scanners en deeltjesversnellers, en in bepaalde type quantum computers. Supergeleiding is echter slechts één voorbeeld van waar interacties tussen elektronen toe kunnen leiden: voor andere, net zo interessante verschijnselen uit de kwantummechanica, zou ik iets vergelijkbaars kunnen vertellen.

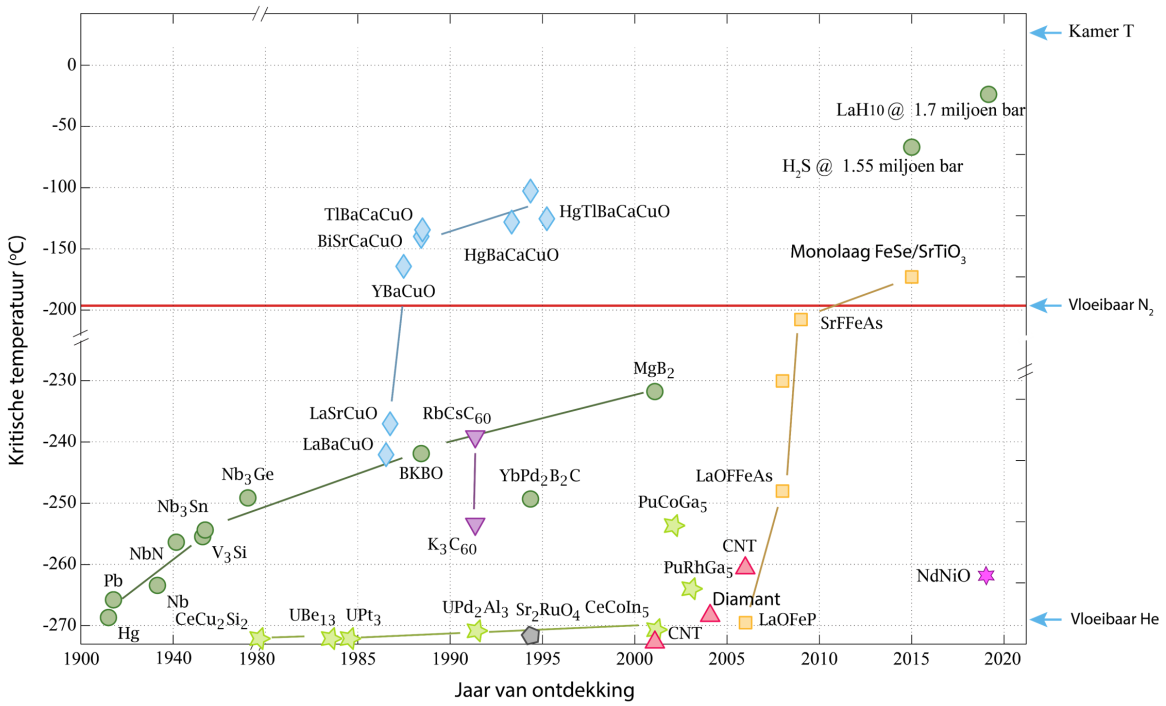


Figuur 10. Huidige toepassingen van supergeleiders. Van links boven tegen de klok in: Zwevende trein, MRI scanner, deeltjesversnellers, bepaalde type quantum computers.

We hebben dus een toenemend aantal technologieën die gebaseerd zijn op de fantastisch interessante verschijnselen uit de kwantummechanica. Daarmee is het duidelijk dat we niet simpelweg kunnen stellen: 'We hoeven niet over kwantummechanica na te denken, omdat het iets is uit de wereld van atomen en moleculen.' Nee, we gebruiken nu al verschijnselen uit de kwantummechanica op veel verschillende manieren, en dat zal alleen maar meer worden. Daarmee is het een belangrijke theorie om te begrijpen en bestuderen, en daarom is het ook zo belangrijk dat de universiteit deze leerstoel heeft ingesteld.

Om de supergeleiding voor elkaar te krijgen, moest ik vloeibaar stikstof gebruiken. Vloeibaar stikstof heeft een kooktemperatuur van -196 graden Celsius onder nul. Koud dus. Het is een experimenteel feit dat supergeleiding alleen voorkomt onder een bepaalde, materiaal specifieke kritische temperatuur. In nagenoeg alle gevallen is er vloeibaar stikstof, of zelfs vloeibaar helium nodig om iets supergeleidend te maken. Maar om supergeleiding op grote schaal toe te passen, kan dat niet. De afgelopen iets meer dan honderd jaar hebben vele onderzoekers daarom geprobeerd om de kritische temperatuur op te krikken. Op de kaart in figuur 11 ziet u daarvan het resultaat. Kamertemperatuur staat helemaal rechtsboven. De laatste jaren komen we in de buurt, maar alleen door materialen samen te persen onder gigantisch hoge drukken, met meer dan een miljoen keer de luchtdruk op aarde. Ook niet echt praktisch.

Hoe nu verder? Wel, om de kritische temperatuur op te kunnen krikken, moeten we eerst weten waardoor het beperkt wordt. Want voor heel veel supergeleiders weten we dat helemaal niet.



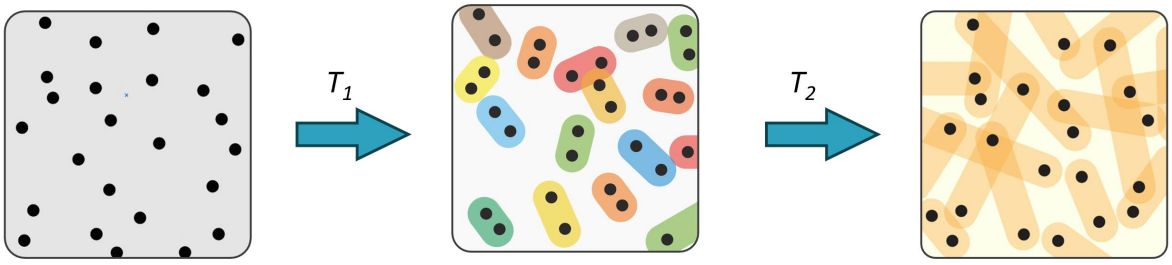
Figuur 11. Tijdlijn van supergeleiding. Voor verschillende supergeleiders wordt het jaar van ontdekking gegeven, en hun kritische temperatuur.

In een supergeleider boven de kritische temperatuur gedragen de elektronen zich individualistisch, net zoals in metalen. Alle spreeuwen vliegen allemaal een andere kant op. Als je het materiaal koelt tot beneden de kritische temperatuur, gebeuren er twee dingen (figuur 12):

1. de elektronen vormen paren
2. de paren condenseren. De zwerm spreeuwen wordt gevormd.

Meestal vinden deze twee dingen tegelijkertijd plaats ($T_1 = T_2$). Maar dat hoeft natuurlijk niet. Het zou kunnen dat naarmate je een materiaal afkoelt, er zich bij een bepaalde temperatuur (T_1) eerst paren vormen, en dat je dan nog verder moet koelen voordat er condensatie is (bij T_2). En wat is dan de beperkende factor: de sterkte van de lijm die de elektronen bij elkaar houdt? Of is het toch de wisselwerking tussen alle paren?

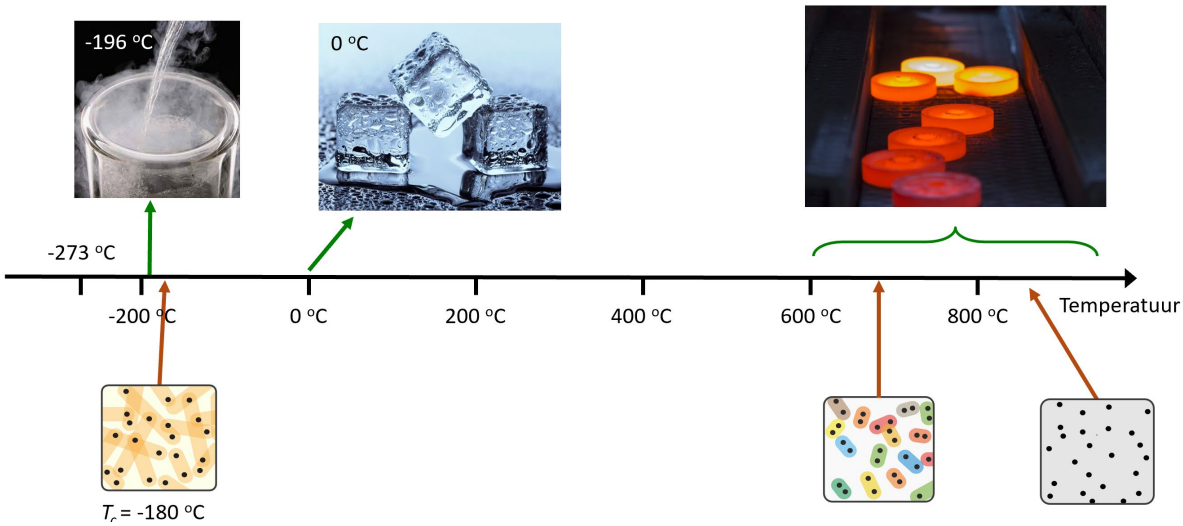
Om hier een antwoord op te geven, hebben we recent onderzoek gedaan naar een supergeleider heel vergelijkbaar met het materiaal in het schijfje dat ik net heb gebruikt in het experiment.



Figuur 12. Bij hoge temperatuur gedragen elektronen zich individueel. Onder een bepaalde temperatuur vormen er zich paren, en die paren condenseren. De temperaturen waarbij deze twee dingen plaatsvinden kunnen hetzelfde zijn, maar dat hoeft niet.

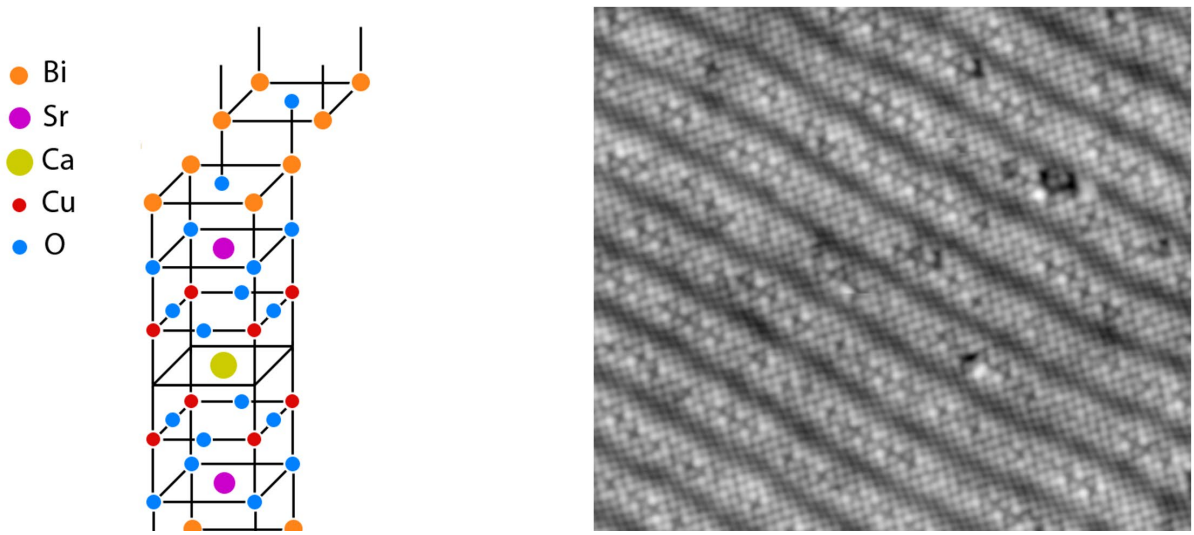
En dat hebben we gedaan door, misschien heel tegen intuïtief, heel precies naar de ruis in onze metingen te kijken. Ik zou graag uitleggen hoe dit precies werkt, maar daarvoor ontbreekt helaas de tijd. Hopelijk wilt u van me aannemen dat als de tunnelstroom bestaat uit elektronenparen, de ruis twee keer zo groot is als wanneer de stroom bestaan uit losse elektronen. Door bij verschillende energieën te meten hoeveel ruis we hebben, kunnen we exact bepalen hoeveel energie we nodig hebben om de elektronenparen uit elkaar te laten vallen. Met andere woorden: hoe sterk de lijm is waarmee de elektronen aan elkaar vastzitten. En als we weten hoe sterk de lijm is, kunnen we uitrekenen bij welke temperatuur ze uit elkaar zouden vallen.

Dit experiment hebben we recent gedaan, zie figuur 13. Horizontaal staat de temperatuur. We weten dat dit materiaal supergeleidend wordt bij een temperatuur van ongeveer 185 graden onder nul. We weten ook dat voor hele hoge temperatuur er alleen losse elektronen zijn. De vraag is dan: tot welke temperatuur is de lijm tussen de elektronen sterk genoeg om ze bij elkaar te houden? Het antwoord is dat je een temperatuur van 700 graden Celsius nodig hebt om de elektronenparen uit elkaar te laten vallen! Dat is een temperatuur waarbij metalen al rood gaan gloeien! Veel hoger dus dan nodig is voor supergeleiding bij kamertemperatuur. En dus wordt de kritische temperatuur van deze supergeleider beperkt door de condensatie van de elektronen paren. Waar dat aan ligt is op dit moment niet duidelijk, en zal onderwerp zijn van verder onderzoek.



Figuur 13. De supergeleider BSCCO-2212 wordt supergeleidend bij temperaturen lager dan 180 °C. Uit ruismetingen vinden we dat de 'lijm' die de elektronenparen bij elkaar houdt, sterk genoeg is om supergeleiding te hebben bij temperaturen tot zo'n 700 °C.

Deze supergeleider bevat 5 verschillende elementen, Bismuth, Strontium, Calcium, Koper en Zuurstof, zie afbeelding 14. Die zijn op een zeer specifieke manier gerangschikt in 7 laagjes. Daarmee is het een behoorlijk complex materiaal. U kunt zich voorstellen dat er zich tijdens het maken van dit materiaal allerlei imperfecties kunnen vormen: missende atomen, atomen die op een verkeerde plek zit, etc. Inderdaad, als we met onze microscoop naar het oppervlak van deze supergeleider kijken, dan zien we inderdaad nogal wat contrast. Dit is een hypothese, maar op basis van onze resultaten vermoed ik dat door deze inhomogeniteiten te verminderen, we de kritische temperatuur flink kunnen optrekken. Een mooie uitdaging voor mijn vastestofchemie collega's!



Figuur 14. Er zitten vijf verschillende chemische elementen in de supergeleider BSCCO-2212 (links), en die atomen zijn gerangschikt in zeven laagjes. Een STM plaatje van het oppervlak (rechts) laat veel contrast zien, wat duidt op inhomogeniteiten.

Veel onderzoek dat bij universiteiten gedaan wordt, ook dat van mij, is fundamenteel van aard, of te wel onderzoek zonder dat we meteen een toepassing in gedachten hebben. Universiteiten zijn eigenlijk de enige plek waar dat soort onderzoek gebeurd. Waarom doen we dat? Nou, enerzijds om dezelfde redenen als waarom mensen bergen beklimmen, of naar de diepste plekken in de zee duiken, of zelfs naar Mars willen: mensen zijn nieuwsgierig. Bovendien blijkt dat fundamenteel onderzoek veel later wel degelijk tot toepassingen kan leiden. Een heel mooi voorbeeld daarvan is het Dopplereffect. Dat is het effect dat de toon van een sirene omhooggaat als de ambulance naar u toe komt rijden, en deze lager wordt als de ambulance zich van u verwijdert. Dat zoiets zou kunnen bestaan, is bedacht door Prof. Doppler in 1842 om te verklaren waarom de kleur van sommige sterren tijdens het jaar veranderde. Bedenk dat dit de tijd is van paard-en-wagen. Er waren helemaal nog geen sirenes! Een van mijn verre voorgangers, Prof Buys Ballot, vond het de moeite waard om experimenteel te onderzoeken of dit effect inderdaad bestond. Daar zit echt een prachtig verhaal met treinen en muzikanten achter. Prof Buys Ballot realiseerde zich dat het nieuw aangelegde spoor tussen Utrecht en Maarssen de mogelijkheid bood om de theorie van Doppler te testen, als hij de trein maar hard genoeg liet rijden. Hij is toen naar het ministerie van binnenlandse zaken gegaan om te vragen of hij een locomotief kon lenen om de experimenten te doen. Hij liet muzikanten een noot spelen, en vroeg verschillende mensen met een absoluut gehoor welke noot ze hoorden toen de trein op hen af kwam rijden, en welke noot ze hoorden toen de trein wegreed. Allemaal prachtig beschreven met controle experimenten in het Nederlands Muzikaal Tijdschrift Caecilia, zie afbeelding 15.

Utrecht, 15 Augustus 1845. **CAECILIA.** Tweede Jaargang. No. 16.

ALGEMEEN MUZIKAAL TIJDSCHRIFT VAN NEDERLAND.

Buitenlandsche Correspondenten:
De HH. BECHER, BECKER, BRENDEL, DEHN, DROBISCH, FINK, GASSNER, KÜHMSTEDT, LOBE, PHILOKALES, PITSCH, RITTER, SCHILLING, ALOYS SCHMITT, WIEGAND en vele anderen.

Redacteur: Dr. F. C. KIST.

De GEABONNEERDEN zullen den *eersten* en *vijftienden* van iedere maand een nommer (minstens één vel druks) van dit Tijdschrift ontvangen, en daarenboven jaarlijks eenige Muzikale bijlagen en een Portret.

Verhandelingen, Biographiën, Beoordeelingen, Binnenlandsche en Buitenlandsche Berigten, Feuilleton en mededeeling van nieuw uitgekomen Muzijkwerken, zullen den inhoud van het Tijdschrift uitmaken.

Men ABONNEERT zich bij elken soliden Boek- en Muzijkhandelaar en aan alle Postkantoren.

Prijs van het Abonnement:
Geh. jaar ƒ 6.00, franco per post ƒ 7.00
Halfjaar. » 3.50, » » » » 4.00
Kwartaal » 2.00, » » » » 2.50

Met uitzondering van de gewone Correspondenten, zij de inzending *franco* onder adres van de Uitgevers of van de Heeren Erven ONDER DE LINDEN, Boekhandelaars te Amsterdam.

VERHANDELINGEN.

BEDROG VAN HET GEHOOROORGAAN IN HET BEPALEN VAN DE HOOGTE VAN EENEN WAARGENOMEN TOON.

Bewezen door proeven, op den Rijn-Spoorweg tusschen Utrecht en Maarssen, in Junij genomen.

Ik zal in het mededeelen der uitkomst kort wezen, in zoo verre ik mij alleen tot de opgave der waarnemingen zal bepalen. In de onderstaande tabellen bevat elke kolom datgene, wat aan het hoofd derzelve is uitgedrukt. In de tabellen betrekkelijk tot den 3. Junij bevatten de twee eerste, en in die, welke de proeven van den 5. Junij behelzen, bevatten de drie eerste kolommen, de onmiddelijke uitkomst der waarnemingen, zoo als ze mij zijn medegedeeld; dan volgen twee kolommen, die opgeven hoe de toon volgens de theorie had moeten zijn, op ieder van welke onmiddelijk eene kolom volgt, die de verschillen der theorie met de waarneming bevat. Alle deze grootheden zijn uitgedrukt in zestiende gedeelten van eenen geheelen toon, zoodat bijv. een halve toon wordt aangeduid door het getal 8, een vierde toon door 4, omdat $\frac{8}{16}=\frac{1}{2}$; $\frac{4}{16}=\frac{1}{4}$ is enz. In de tabellen van den 5. Junij heb ik het resultaat der theorie vergeleken met de gemiddelde waarde, die door de beide waarnemers opgegeven was. Men zoude kunnen vragen, waarom ik twee verschillende waarden mededeel als uitkomst der theorie, en het is ook noodzakelijk, dat ik mij hieromtrent verklaar. Wanneer men de verhouding zoekt tusschen twee op een volgende toonen, welke te zamen een octaaf uit maken,

c d e f g a b h C

zoo heeft men gevonden, dat deze ongelijk is; de verhouding van *c* tot *d* is anders dan die van *d* tot *e*; die van *g* tot *a* anders dan van *a* tot *b*, terwijl de verhouding van *e* tot *f* en van *h* tot *c* slechts nagenoeg de helft van de vorige verhoudingen is. Men heeft daarom tusschen *c* en *d*, *d* en *e*,

Figuur 15. Editie van Caecilia, waar Buys Ballot publiceerde over zijn metingen aan het Dopplereffect

Op het einde van het artikel schrijft Buys Ballot: ‘Vraagt men eindelijk wat nut geven deze waarnemingen, zoo is er voor hands niets bepaalds voor aan te geven’ Om daar meteen aan toe te voegen, ‘… maar men weet niet hoe onverwacht soms eene nieuw gevonden waarheid hare toepassing vindt’. Nu, 180 jaar na dat experiment, maken velen van u onbewust bijna dagelijks gebruik van het Doppler effect: het ligt namelijk ten grondslag aan de werking van onder andere buienradars, medische echo’s, en snelheidsmetingen door de politie. Wie weet waar het fundamenteel onderzoek dat mijn collega’s en ik nu doen in de toekomst voor gebruikt kan worden? Dit geldt niet alleen voor onderzoek in de natuurwetenschappen, maar ook voor onderzoek in andere disciplines, zoals medische-, sociale-, en geesteswetenschappen. Wat dit

Figuur 16. Muurschildering over de experimenten aan het Dopplereffect van Prof. Buys Ballot

verhaal hopelijk duidelijk maakt, is de waarde van fundamenteel onderzoek, wat dus zoals gezegd eigenlijk alleen maar aan universiteiten plaatsvindt. Daar moeten we zuinig op zijn!

Ik vind het bijzonder belangrijk dat dit verhaal wordt uitgedragen aan de samenleving. Wij worden als Universiteit Utrecht immers grotendeels gefinancierd door u, door de belastingbetaler. Het is daarom belangrijk om de samenleving te laten zien wat we doen, en waarom we dat doen. Daar hoort deze oratie ook bij. Maar we slagen er niet altijd even goed in, blijkens de, in mijn optiek ondoordachte, bezuinigingen die de huidige regering oplegt aan het hoger onderwijs en onderzoek. In het huidige regeerprogramma staat 85x 'innovatie'. En dan hard bezuinigen op de bron van die innovatie.... De logica is hier ver te zoeken, maar dat geldt voor wel meer onderdelen van het beleid van de huidige regering.....

Zoals u misschien al wel gemerkt heeft, is dit een onderwerp dat me na aan het hart ligt. Daarom ben ik samen met Sander Kempkes en de mensen van de Strakke Hand een serie muurschilderingen begonnen over fundamenteel wetenschappelijk werk dat hier in Utrecht is gedaan, waaronder dus een schildering over het experiment van Buys Ballot, zie figuur 16. Mensen die hier in Utrecht wonen en/of werken zullen al veel van de 6 schilderingen hebben gezien, maar voor de mensen van buiten: er zijn er een paar in de buurt van het Academiegebouw te vinden. Mocht u wat tijd hebben, dan is het de moeite waard om straks even langs de Strosteeg, de Ganzemarkt, en de Wijde Begijnestraat te wandelen.

Tot slot wil ik nog iets zeggen over onderwijs, ik ben tenslotte benoemd tot hoog-LERAAR.

Een opleiding is datgene wat resteert nadat je alles bent vergeten dat je op de universiteit hebt geleerd.

Deze uitspraak is natuurlijk enigszins gechargeerd. Als u een ongeluk heeft gehad, kan ik u uit persoonlijke ervaring zeggen dat u dan geholpen wilt worden door een ter zake kundige arts. Maar het herinnert ons er wel aan wat het doel van een opleiding zou moeten zijn: het ontwikkelen en trainen van de mentale vermogens van onze studenten. Het zijn namelijk deze

vermogens die hen in staat stellen om in een grote verscheidenheid aan banen goed te presteren – ook als die baan inhoudelijk niet in het verlengde van hun studie ligt.

Ik ben ervan overtuigd dat die probleemoplossende vermogens het beste worden getraind door het vervlechten van onderwijs en onderzoek. In een onderzoeksproject moeten studenten zich namelijk, vaak in korte tijd, inwerken in een nieuw gebied en daar een zinnige bijdrage aan leveren. Door deze vervlechting van onderwijs en onderzoek kunnen we onze studenten dan ook een 'opleiding' geven zoals bedoelt met deze uitspraak. Die vervlechting van onderzoek en onderwijs is mijns inziens dan ook de unieke meerwaarde van een universitaire studie.

Probleemoplossend vermogen is bij uitstek iets dat we onze Scheikunde en Natuurkunde studenten aanleren. Deze vaardigheid maakt onze afgestudeerden zo aantrekkelijk voor toekomstige werkgevers. Het kost echter veel tijd en oefening om die vaardigheden aan te leren. Momenteel wordt er, binnen en buiten de universiteit, veel gesproken over de noodzaak om interdisciplinair samen te werken. En ja, het is inderdaad belangrijk dat je met specialisten op andere gebieden kunt praten. Maar laten we niet vergeten dat dat alleen maar kan als de monodisciplinaire basis op orde is, en niet het kind met het badwater weggooien. Laten we studenten die dat willen dan ook vooral de vrijheid geven om helemaal de diepte in te gaan.

Hoogleraar worden doe je niet alleen, dus ik kan niet afsluiten zonder een aantal mensen te bedanken.

Allereerst het college van bestuur van de Universiteit Utrecht, en de besturen van de Faculteit Bètawetenschappen, en de departementen Scheikunde en Natuurkunde. Dank voor het in mij gestelde vertrouwen. Het is een enorm voorrecht om hoogleraar te mogen zijn aan deze mooie universiteit. En dit geldt voor veel van mijn collega's: we hebben toch een beetje een betaalde hobby.

Ook ben ik veel dank verschuldigd aan de personen die mij hebben opgeleid. De professoren John Kelly, Andries Meijerink, Frank de Groot, Bert Weckhuysen, en vooral Daniel Vanmaekelbergh. Jullie hebben allemaal, elk op jullie eigen manier, me de vaardigheden bijgebracht die me tot dit punt hebben gebracht. Ik ben er trots op dat ik jullie collega mag zijn.

In het nieuwe stelsel over erkennen en waarderen van de universiteit wordt teamwork expliciet genoemd. En terecht: mijn onderzoek doe ik niet alleen. Natuurlijk zijn daar de promovendi en studenten: jullie doen het echte werk in het laboratorium. Helaas heb ik tegenwoordig niet meer zoveel tijd om zelf aan de knoppen te zitten en/of te sleutelen, maar vergeet alsjeblieft niet om me zo nu en dan achter m'n bureau vandaan te halen en me mee te nemen naar het lab. Ik kon vandaag helaas niet van iedereen resultaten laten zien. Dat reflecteert niet mijn waardering voor jullie werk, maar de hoop om een enigszins samenhangend verhaal voor een breed publiek te kunnen vertellen. Dank jullie wel!

Om Toon Hermans te citeren: er gaat meer boven m'n pet dan eronder. Dat geldt ook voor mij. Om verder te komen in het onderzoek, werk ik veel samen met anderen die complementaire kennis hebben, binnen de universiteit, maar zeker ook daarbuiten. Door de jaren heen heb ik met veel mensen samengewerkt, teveel om hier allemaal bij naam te noemen. Daarom beperk ik me tot de mensen met wie ik al samenwerk sinds ik in 2012 in Utrecht begon: Cristiane de Morais Smith, Peter Liljeroth, en Daniel Vanmaekelbergh.

Het team is echter veel groter en breder: wat betreft apparatuur zoeken we vaak het randje op van wat er technisch mogelijk is. Alleen dankzij de spullen die de technici van de CMI groep en

van de instrumentatieafdeling van de faculteit maken en repareren kunnen we ons onderzoek doen. En die apparatuur moet in een geschikt en veilig laboratorium staan, wat alleen kan dankzij de inzet van de mensen van huisvesting en die bij Arbo- en veiligheid. En datzelfde geldt ook voor HR en IT afdelingen, en zonder de organisatorische ondersteuning van wat tegenwoordig MOAs heten, zou heel veel spaak lopen. Fijn dat jullie er vandaag ook bij zijn!

Bij het lezen van de titel van deze oratie, 'Door het oog van de naald' zullen velen van u hebben gedacht aan 'Op het nippertje ontsnappen'. Die betekenis heeft het voor mij natuurlijk ook. Ik ben veel dank verschuldigd aan de Traumatologieafdeling van het UMC Utrecht, en aan revalidatiecentrum de Hoogstraat. Speciaal wil ik hier Mirjam de Jong en Rosalide Tempelaars van het UMC en Nelie Sikkema en Jessica van der Lede van de Hoogstraat noemen. Zonder hen had ik hier allereerst figuurlijk, maar ook letterlijk niet gestaan. Het betekent veel voor me dat jullie er vandaag zijn! Jullie hebben bijna net zo'n mooie baan als ik, bijna.

Ik prijs me gelukkig dat ik in Ankeveen woon. Ik voel me echt thuis in het dorp. De zinsnede 'Ankeveen, je hebt er niks, maar je vindt er alles' zegt heel veel. Jullie stellen me in staat om regelmatig uit de universitaire bubbel te stappen. Ik hoop dat ik jullie vandaag ook een andere bubbel heb kunnen laten zien. En een oproep aan de Vets: ik hoop dat jullie straks een aantal mensen inwijden in het edele dobbelspel. Ik geloof!

Tot slot mijn familie en schoonfamilie. De vrijheid en het vertrouwen die ik altijd van jullie heb gekregen om mijn interesses na te jagen, waren essentieel. Die vrijheid en vertrouwen probeer ik door te geven.

Dank je wel ook Leonoor, voor wie je bent. Een van de mooiste dingen in mijn leven is om jou te zien opgroeien. Ik ben trots op je!

Mijn laatste woorden zijn voor jou Charlotte. Ik weet dat je er niet van houdt om in de spotlights te staan, maar tijdens een oratie is het de bedoeling dat iedereen stil blijft, ook jij. Je bent mijn rots in de branding waarop ik onvoorwaardelijk kan bouwen, en door dat rottige ongeluk is de branding best heel heftig geweest, zeker ook voor jou. Dank je voor je liefde, geduld en steun. Samen kunnen we wereld aan. Ik hou van je!

Ik heb gezegd.