



Universiteit Twente
de ondernemende universiteit



Fascinerende Materie

door Prof. dr. ir. Hans Hilgenkamp

Fascinerende Materie

Rede uitgesproken bij
het aanvaarden van het ambt
van hoogleraar

Condensed Matter Physics and Devices

aan de Faculteit Technische Natuurwetenschappen
van de Universiteit Twente
op donderdag 9 maart 2006
door

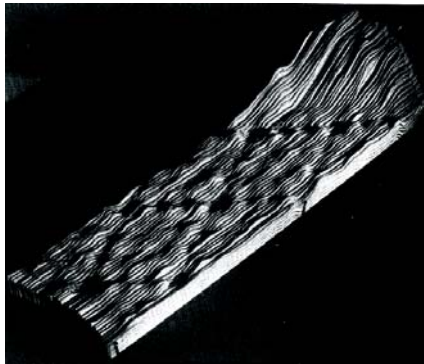
Prof.dr.ir. Hans Hilgenkamp

Fascinerende Materie

Mijnheer de Rector Magnificus, beste familie, vrienden, collega's en studenten,

Bij mijn ouders thuis waren we vroeger geabonneerd op het Zutphens Dagblad. Daarin stond elke week een klein stukje over nieuws uit de wetenschap. Het was de eerste helft van de jaren '80 en die berichtjes lezende raakte ik gefascineerd door de mogelijkheden die wetenschappers hadden geschapen om bijvoorbeeld hele kleine signalen te meten of heel ver in het heelal te kijken. Zinnetjes als 'als je in Los Angeles een fietslampje laat branden kan je dat in New York meten', gingen er bij mij in als koek. Dat de ronding van de aarde hiervoor nog een klein obstakel vormt, werd voor het gemak even over het hoofd gezien.

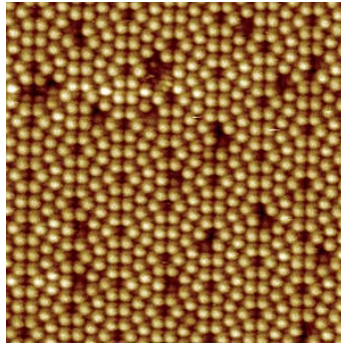
Een bericht dat mij met stomheid sloeg ging over dit plaatje:



Figuur 1: Eerste directe afbeelding van de atomaire rangschikking aan het (111)-oppervlak van een Silicium-kristal, verkregen met een Scanning Tunneling Microscoop [1].

Niet echt spectaculair? Laat ik er dan het volgende bij vertellen. Degene die deze metingen gedaan heeft, zei er enige jaren later het volgende over: 'I could not stop looking at the images. It was like entering a new world. This appeared to me as the unsurpassable highlight of my scientific career and therefore in a way its end.' oftewel: 'Ik kon niet ophouden naar deze plaatjes te kijken. Het leek alsof ik een nieuwe wereld binnentrad. Het scheen me toe als het absolute hoogtepunt van mijn carrière en daarmee ook in zekere zin het einde'.

Deze uitspraak deed Gerd Binnig in december 1986, toen hij met Heini Rohrer de Nobelprijs voor natuurkunde kreeg voor de ontwikkeling van de Scanning Tunneling Microscope (STM), waarmee deze metingen zijn gedaan [2]. Bij een STM wordt een elektrisch geleidende naald vlak boven een te bestuderen oppervlak gehouden en hiertussen wordt een spanningsverschil aangelegd. Aangemoedigd door de wetten van de quantum-fysica proberen de elektronen 'slootje te springen' van het oppervlak naar de naald. Het aantal elektronen dat de overkant haalt, dus de elektrische stroom, hangt sterk af van de afstand tussen de naald en het oppervlak. Je kan nu de naald langs het oppervlak bewegen en kijken naar de elektrische stroom als functie van de plaats en daarmee een heel nauwkeurig plaatje maken van het oppervlak, waarbij zelfs de individuele atomen zichtbaar worden.



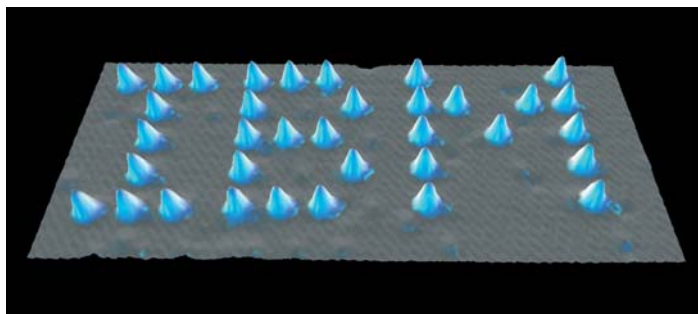
Figuur 2: Afbeelding van het Si (111) oppervlak zoals dat heden ten dage met een Scanning Tunneling Microscop kan worden verkregen [3].

De opname van figuur 1 is genomen in de herfst van 1982. Het betreft het oppervlak van een silicium kristal, zoals je dat krijgt als je die langs een bepaalde richting doorsnijdt. Het was tot die tijd een onopgelost raadsel hoe precies de atomen op het oppervlak van dergelijke silicium kristallen gerangschikt zijn, en de directe afbeelding van de atomen met de STM bracht de oplossing. Natuurlijk was Binnig's enthousiasme mede ingegeven door het feit dat hij wist dat zijn technieken snel zouden worden geperfectioneerd, zodat er binnen korte tijd plaatjes zoals figuur 2 konden worden gemaakt van hetzelfde kristaloppervlak.

Ik vond dat echt geweldig.

Al zo'n 2500 jaar geleden stelden de Griekse filosofen Leucippes (ong. 470-410 v.Chr.) en Democritus (ong. 460-380 v.Chr.) voor, dat materie is opgebouwd uit elementaire bouwstenen, de atomen. Pas sinds de vorige eeuw, met de ontwikkeling van de quantum-fysica, weten we zeker dat die atomen inderdaad bestaan en dat zij op hun beurt weer zijn opgebouwd uit positief geladen atoomkernen en negatief geladen elektronen die om deze atoomkernen heen bewegen. Terwijl die oude Grieken al nadachten over de bouwstenen van de materie, was de mensheid, onder aanvoering van de natuurkundigen, nu zover gekomen dat we individuele atomen op een oppervlak zichtbaar konden maken.

Bij zo'n club wilde ik ook horen, en ik besloot daarom technische natuurkunde te gaan studeren. Hoe letterlijk ik dat 'bij de club horen' later zou kunnen nemen, kon ik toen nog niet beseffen. Een dikke tien jaar later speelde ik samen met Gerd Binnig in het IBM zaalvoetbalteam.



Figuur 3: Demonstratie van controle op atomaire schaal, in de vorm van Xenon atomen geplaatst op een nikkel ondergrond [4].

Enige jaren na de uitvinding van de Scanning Tunneling Microscope, in 1990, was Don Eigler, die net als Binnig en Rohrer werkzaam was bij IBM, in staat om met dit apparaat zelfs enkele atomen op te pakken en gecontroleerd op een andere plek weer neer te zetten [4]. In dit geval gaat het om Xenon-atomen op een nikkel ondergrond. De hoogte van de letters in dit plaatje is 5 nanometer, waarbij 1 nanometer een miljoenste deel van een millimeter is. Nog steeds is dit een kunststukje dat niet zo maar even nagedaan wordt, maar het is een prachtige demonstratie van de mogelijkheid die er nu bestaat op atomaire schaal structuren te maken. Dit is een mijlpaal in de

nanowetenschap, die zich bezig houdt met de fabricage en bestudering van structuren met afmetingen kleiner dan zo'n 100 nm.

De Scanning Tunneling Microscope heeft aan de basis gelegen van een heel scala aan zogeheten 'Scanning Probe Microscopy' technieken, waarbij men met een kleine sensor in een rastervorm over een oppervlakte gaat en daarbij een plaats-afhankelijke meting doet. Ook hier aan de Universiteit Twente wordt in verschillende groepen met scanning probe microscopen gemeten en aan de ontwikkeling van nieuwe varianten hiervan gewerkt. Voor wat betreft de scanning tunneling microscopie noem ik hierbij met name Prof. Zandvliet. In mijn groep experimenteren we met scanning SQUID microscopen, waarmee we heel gevoelig op kleine schaal magneetvelden kunnen meten. Ik kom daar later in mijn lezing nog op terug.



Figuur 4: Heike Kamerlingh Onnes, Johannes Georg Bednorz & Karl Alex Müller.

In het eerste jaar van mijn studie aan wat toen nog de Technische Hogeschool Twente was, in het voorjaar van 1986, werd in hetzelfde IBM Research Lab in Zürich waar ook de STM vandaan kwam, de misschien wel meest opzienbare vinding in de natuurkunde in de afgelopen vijftig jaar gedaan. Het was de ontdekking van de hoge temperatuur supergeleiding, door Johannes Georg Bednorz en Karl Alex Müller [5]. De wetenschappelijke impact van hun vondst wordt onderstreept door het feit dat zij reeds het jaar erop, in 1987, de Nobelprijs voor natuurkunde kregen. Nooit is de Nobelprijs zo snel na een ontdekking toegekend. De hoge temperatuur supergeleiding bouwt voort op een echte Nederlandse ontdekking. In 1911 namelijk, vonden medewerkers in de groep van Prof. Heike Kamerlingh Onnes in Leiden dat de elektrische weerstand van kwik bij afkoeling in vloeibaar helium geheel naar nul zakt [6]. Dit was een erg bijzondere constatering, omdat tot dan toe voor

alle processen waarbij beweging een rol speelt, een zekere mate van wrijving en dus weerstand als een natuurlijk gegeven optrad.

De temperatuur van vloeibaar helium is 269 graden onder nul. In de natuurkunde spreken we gemakshalve van 4 graden Kelvin, waarbij 1 graad Kelvin net zo groot is als 1 graad Celsius, maar dan vanaf het absolute nulpunt van $-273\text{ }^{\circ}\text{C}$ gerekend. Kamerlingh Onnes noemde het verschijnsel van de verdwijnende weerstand 'suprageleiding', nu zeggen we 'supergeleiding', en kreeg in 1913 de Nobelprijs voor zijn onderzoek aan de eigenschappen van materialen bij lage temperaturen en de ontwikkeling van methoden om vloeibaar helium te produceren.

Lange tijd is onduidelijk geweest hoe supergeleiding nu eigenlijk precies werkt. Voor normale geleiders, zoals bijvoorbeeld koperdraad, geldt dat de elektrische stroom wordt verzorgd door elektrisch geladen deeltjes, de elektronen, die onder invloed van een elektrisch veld, oftewel de spanning, door een materiaal kunnen bewegen. U moet zich dat overigens zo voorstellen dat de elektronen met een snelheid van ongeveer duizend kilometer per seconde alle kanten op vliegen in het metaal, en dat het geheel van alle elektronen tezamen zich als een wolk met een snelheid van een paar millimeter per seconde langzaam door het materiaal voortbeweegt, zodat er effectief toch lading van de ene naar de andere kant getransporteerd wordt.

Normaal gesproken botsen de elektronen regelmatig tegen trillende atoomkernen of bijvoorbeeld tegen onzuiverheden in het materiaal, waardoor zij weerstand in hun beweging ondervinden en een gedeelte van hun energie afgeven in de vorm van warmte. In veel toepassingen, zoals de gloeilamp of de elektrische kookplaat maken we dankbaar gebruik van deze weerstand.

In supergeleiders gebeurt er echter iets heel bijzonders. In 1957 vonden John Bardeen, Leon Cooper en Robert Schrieffer, dat als er om de een of andere reden een aantrekking is tussen de elektronen onderling, alle elektronen samenklonteren tot een groot geheel, het zogeheten condensaat. Dit condensaat kan zonder belemmeringen, en dus ook zonder weerstand, door het materiaal bewegen. Je zou een analogie kunnen maken met dansen. In een normale geleider bewegen de deeltjes allemaal individueel, zoals in een discotheek. Iedereen die het wel eens geprobeerd heeft weet dat het niet makkelijk is in een volle discotheek van de ene naar de andere kant te bewegen. Bij supergeleiders kan je denken aan een groep volksdansers,

er worden dansparen gevormd, die onderling ook allemaal op dezelfde manier bewegen en daardoor vloeiend door de danszaal gaan. Voor de supergeleiders werd deze collectieve beweging door Bardeen, Cooper en Schrieffer beschreven, hetgeen hen de Nobelprijs van 1972 opleverde. Overigens was dit voor John Bardeen de tweede Nobelprijs, hij had hem ook al in 1956 gekregen voor de ontdekking van de transistor.

Maar hoe kunnen die elektronische dansparen nu worden gevormd? Alle elektronen hebben een negatieve lading en gelijke ladingen stoten elkaar af. Er werd een ingenieuze verklaring gevonden. Als een elektron beweegt in een landschap van positieve atoomkernen dan trekt het heel even de positief geladen atoomkernen wat dichters naar elkaar toe, negatieve en positieve ladingen trekken elkaar per slot van rekening aan. Daardoor vormt het elektron een spoor van iets verhoogde positieve lading in het kristalrooster, en dit spoor trekt weer een ander elektron aan. Op deze manier is er dus een aantrekkende wisselwerking tussen de twee elektronen, en dat is volgens de theorie van Bardeen, Cooper en Schrieffer voldoende om supergeleiding te krijgen.

Vanuit deze succesvolle theorie, die dus pas meer dan veertig jaar na de ontdekking was gevonden, werd voorspeld dat supergeleiding tot een maximale temperatuur van ongeveer 30 Kelvin (dus zo'n 243 graden onder nul) kan plaatsvinden. En dan het best in metalen, omdat daar lekker veel vrij beweeglijke elektronen beschikbaar zijn.



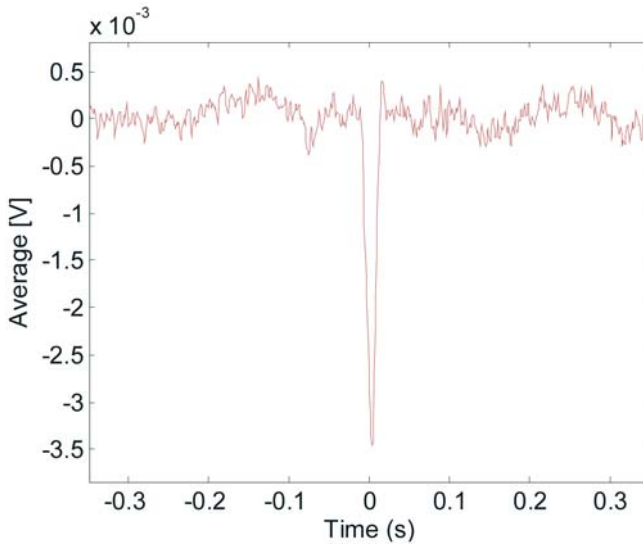
Figuur 5: *Magnetic Resonance Imaging (MRI) apparaat, werkend met supergeleidende magneten, en MRI-scan van een hoofd [7].*

Nu is het niet zo dat vanwege die lage temperaturen supergeleiding slechts een onderwerp was voor natuurkundige onderzoekers, die zich in speciaal daarvoor ingerichte laboratoria vermaakten met elektronisch volksdansen. Supergeleiders lenen zich namelijk uitstekend voor een aantal bijzondere toepassingen. Met supergeleiders zijn bijvoorbeeld zeer sterke magneetvelden te maken, en ook in grotere volumina. Hiervan wordt onder andere gebruik gemaakt in de MRI systemen, zoals die inmiddels in veel ziekenhuizen staan, en waarmee we heel nauwkeurig in het lichaam kunnen kijken. Het feit dat we nu dergelijke medische apparatuur ter beschikking hebben is dus direct terug te voeren tot het fundamentele onderzoek naar het gedrag van materialen bij hele lage temperaturen. Kamerlingh Onnes voorzag wel heel snel de mogelijkheid tot het maken van sterke magneten, maar dat nog eens afbeeldingen zoals in Figuur 5 mogelijk zouden zijn dankzij zijn uitvinding zal hij zeker niet hebben durven dromen.

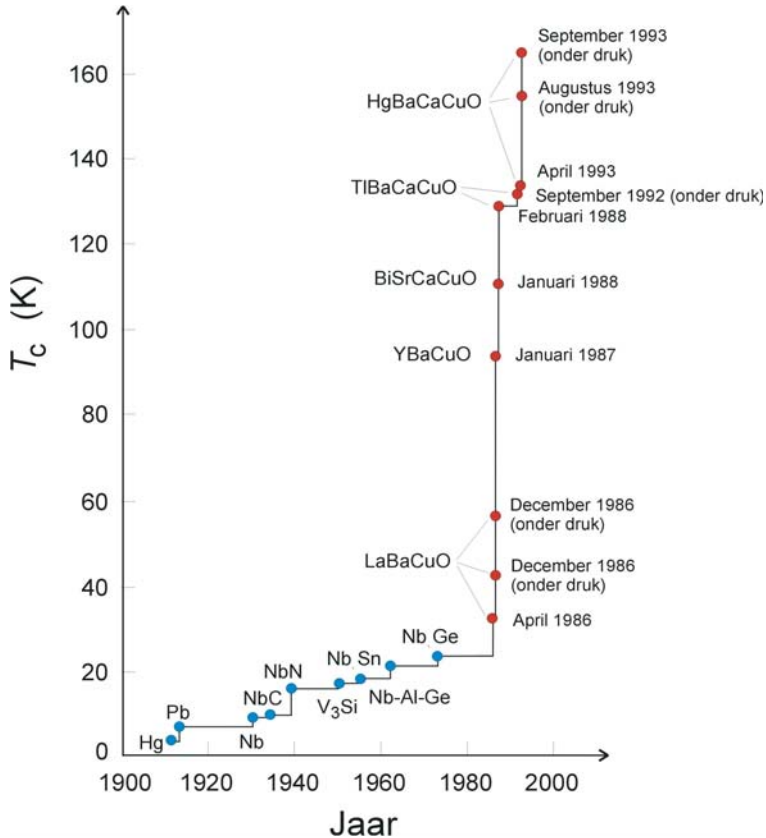
Naast een weerstandsloze geleiding van grote elektrische stromen lenen supergeleiders zich ook uitstekend voor de realisatie van extreem gevoelige sensoren en snelle elektronische schakelingen. De belangrijkste bouwsteen hiervoor is de Josephson junctie. In een Josephson junctie wordt een zwakke koppeling gevormd tussen twee supergeleiders. Om weer de analogie met het dansen te maken, we kunnen ons nu twee zalen voorstellen waarin gedanst wordt, met daartussen een deur. Er kunnen wel paren van de ene naar de andere zaal dansen, maar alleen als ze precies kunnen inhaken bij de dansparen in de andere zaal.

Als we nu een ringvormige supergeleider maken met twee van dergelijke Josephson juncties erin, dan blijkt de elektrische stroom die we over deze ring kunnen sturen sterk afhankelijk te zijn van het magneetveld dat wordt ingekoppeld in de ring. Ik zal niet proberen dit ook nog als element in de volksdans voor te stellen, omdat het u dan mogelijk zal gaan duizelen, maar hopelijk wilt u van mij aannemen dat we daarmee een directe koppeling hebben tussen een magneetveld, dat we graag willen meten, en een erg goed meetbare grootheid, namelijk de maximale elektrische stroom die we door deze ring kunnen sturen zonder dat er weerstand optreedt. Een dergelijke ringstructuur wordt een SQUID genoemd, een afkorting voor Superconducting Quantum Interference Device. Het is een erg gevoelig instrument, waarmee je heel kleine magneetvelden kunt meten, bijvoorbeeld van de hersenen of van het hart van ongeboren kinderen (Fig. 6). Ook is het een erg geschikt instrument om allerlei andere grootheden te meten die kunnen

worden omgezet naar een verandering van het magneetveld, zoals een elektrische stroom of een hele kleine verplaatsing van een object waarop een magneetje is aangebracht.



Figuur 6: Foetaal MagnetoCardioGram van ons derde kindje, waarvan de geboorte begin juni 2006 wordt verwacht, gemeten met de SQUID opstelling aan de Universiteit Twente in de 23e week van de zwangerschap [8].



Figuur 7: Hoogst bekende overgangstemperatuur voor supergeleiders sinds de ontdekking van supergeleiding in kwik in 1911.

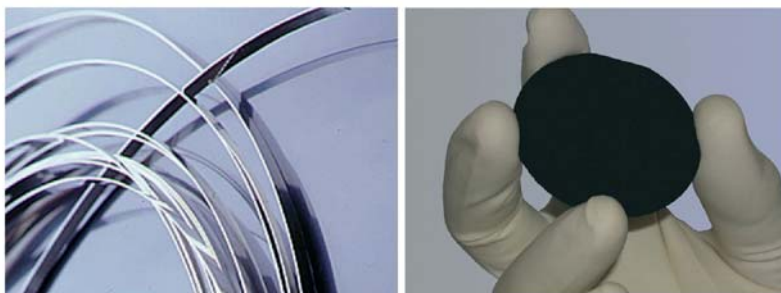
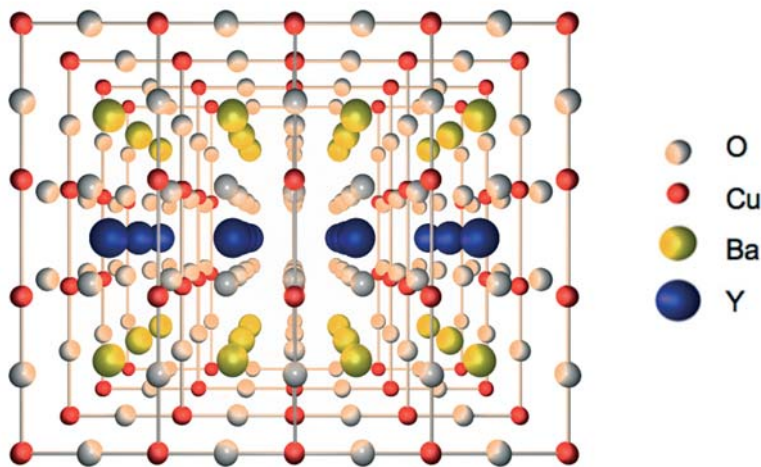
Laten we terugkeren naar de supergeleidende materialen. Er was dus een goede theorie voor supergeleiding en 30 Kelvin werd gezien als de fundamentele bovengrens.

Het was dan ook een enorme verrassing toen in 1986 supergeleiding bij ongeveer 35 Kelvin werd ontdekt, door de eerder genoemde Bednorz en Müller. Deze verrassing was des te groter, omdat het werd gevonden in een bij kamertemperatuur nogal matige geleider, het keramische materiaal

La-Ba-Cu-O. Direct ging men in veel laboratoria over de hele wereld aan de slag met varianten van deze keramische materialen. Er werden al snel verbindingen gevonden met nog hogere overgangstemperaturen, en het werd een ware race om het eerste materiaal te vinden dat supergeleidend zou zijn bij afkoeling in vloeibare stikstof, dus 77 K oftewel 196 graden Celsius onder nul.

In het voorjaar van 1987 slaagde een team onderzoekers onder leiding van Paul Chu in Houston hierin, met hun ontdekking van de hoge temperatuur supergeleider $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$, dat een overgangstemperatuur heeft van 93 K [9]. Dit werd de tot op heden bekendste en meest bestudeerde hoge temperatuur supergeleider. Toch werden er daarna nog weer andere materialen gevonden met nog hogere overgangstemperaturen, zoals $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$ (110 K) en $\text{Tl}_2\text{Ba}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$ (125 K). Het record ligt nu op 138 K in $(\text{Hg}_{0.8}\text{Tl}_{0.2})\text{Ba}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{8.33}$ en onder sterke druk zijn zelfs overgangstemperaturen van ongeveer 160 K bereikt. Dit is 'nog maar' een dikke honderd graden Celsius onder nul...

Met de hogere overgangstemperaturen is het mogelijk gebruik te maken van de bijzondere mogelijkheden van de supergeleiding door koeling met bijvoorbeeld vloeibaar stikstof of simpele koelmachines. Dit is een enorm voordeel ten opzichte van de koeling met vloeibaar helium, dat veel kostbaarder is en technisch ook veel gecompliceerder. Er wordt momenteel naarstig gewerkt aan toepassingen in bijvoorbeeld de energie-voorziening, de telecommunicatie en als sensoren in aardobservatie en medische apparatuur [10].

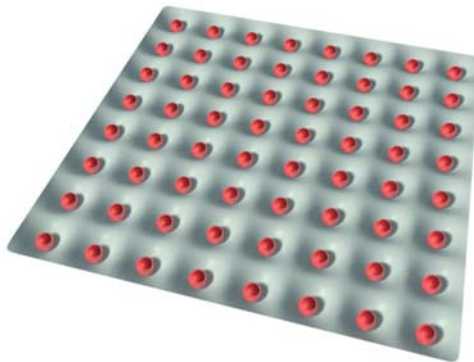


Figuur 8: Kristalstructuur van de hoge temperatuur supergeleider $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$, hoge temperatuur supergeleidende tapes (American Superconductors Corp.) en $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ film voor de fabricage van microgolf filters (Superconducting Technologies Inc.) [10].

Nog steeds, twintig jaar na dato, buigen natuurkundigen zich over de vraag hoe de hoge temperatuur supergeleiding werkt. De verwachting is, dat als we het mechanisme begrijpen we ook beter kunnen bedenken hoe we de eigenschappen voor toepassingen kunnen verbeteren, en hoe we eventueel supergeleiders bij nog hogere temperaturen zouden kunnen maken. Een mooie droom is natuurlijk supergeleiding bij kamertemperatuur, en ik wil niet uitsluiten dat dit inderdaad mogelijk zou kunnen zijn.

Er zijn verschillende theorieën voorgesteld, die in conferenties en in de literatuur soms erg heftig worden bediscussieerd. Sommige bouwen voort op de klassieke concepten van supergeleiding, en ook het magnetisme dat de koperatomen in deze materialen vertonen wordt in de beschouwingen betrokken.

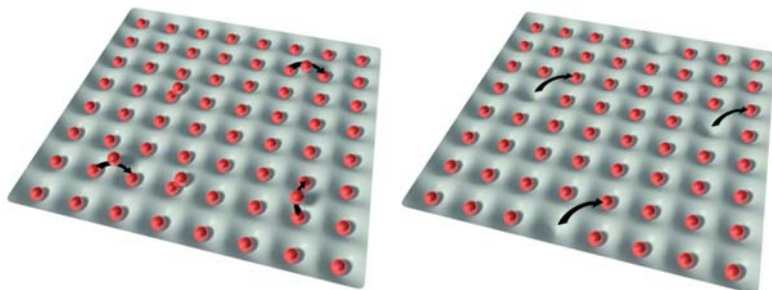
Ook wij proberen te begrijpen hoe het werkt, en hebben daarbij een tamelijk alternatief scenario in gedachten. Dit scenario draait om het beeld dat in deze materialen zowel negatief maar ook positief geladen deeltjes kunnen bewegen. Om dit uit te leggen, wil ik u eerst vertellen dat de hoge temperatuur supergeleiders verwant zijn aan de zogeheten Mott-isolatoren, genoemd naar Sir Neville Mott, die midden vorige eeuw in Cambridge werkte. Waar voor normale metalen de elektronen zich betrekkelijk vrij kunnen voortbewegen als op een snelweg, kunt u zich bij een Mott-isolator het best een hobbelige eierdoos voorstellen, met in elk hokje geen ei maar een elektron.



Figuur 9: Principe van de Mott-isolator.

Nu kan een elektron in principe wel van het ene naar het andere hokje bewegen, maar daar zit al een ander elektron en twee elektronen zitten niet graag met elkaar in één hokje. Vandaar dan ook dat deze materialen slecht geleiden. Eventueel zouden de elektronen met z'n allen tegelijk kunnen bewegen, maar de kans dat ze allemaal precies tegelijk in beweging komen is erg klein. Maar laten we nu eens een extra elektron toevoegen. Dan maakt het voor dat elektron niet zoveel uit of het nu bij de een of bij de ander in

het hokje zit. Dit elektron beweegt zich vrij gemakkelijk door de eierdoos, en het materiaal wordt dus geleidend, hoewel vaak minder goed dan de standaard metallische geleiders.



Figuur 10a,b: Principe van geleiding in gedoteerde Mott-isolatoren, door elektronen-dotering (a) en gaten-dotering (b).

We kunnen deze overgang van een isolerende naar een geleidende toestand ook nog op een andere manier bereiken. Laten we nu weer uitgaan van de geheel gevulde eierdoos, dus de isolator, en we halen een paar elektronen weg. Dan kunnen de overgebleven elektronen gemakkelijker door de eierdoos bewegen, zonder dat er twee elektronen bij elkaar in een hokje hoeven te zitten. Het leuke is dat de eigenschappen van dit systeem heel goed kunnen worden beschreven door niet alle elektronen afzonderlijk te beschrijven, maar door te kijken wat de vrije plaats doet. Zo'n vrije plaats noem je een gat. Als dit gat naar rechts beweegt, gaat er effectief een eenheid van negatieve lading naar links. Dus als we alleen kijken naar de beweging van het gat, kunnen we het beschouwen als een deeltje met een positieve lading.

Dat is wel apart, hè? Eigenlijk is het niets, maar toch gedraagt het zich als een deeltje, en zelfs met een elektrische lading.

Er zijn nu verschillende indicaties dat in de hoge temperatuur supergeleiders tegelijkertijd beweeglijke gaten én elektronen voorkomen. Dit is eigenlijk heel bijzonder omdat gaten en elektronen elkaar sterk aantrekken. U kunt zich voorstellen dat als een elektron een gat ziet, het daarin duikt. Daarbij verdwijnen zowel het beweeglijke elektron als het gat en het materiaal wordt dus weer een isolator. Het lijkt erop dat de kristalstructuur van de hoge tem-

peratuur supergeleiders zo is, om redenen die we nog niet begrijpen, dat er in de evenwichtssituatie tegelijkertijd gaten en elektronen kunnen voorkomen, waarbij de elektronen alleen maar langs bepaalde richtingen kunnen bewegen en de gaten alleen in richtingen diagonaal daarop [11].

Het blijft natuurlijk het geval, dat deze gaten en elektronen elkaar heel sterk aantrekken, en daarmee dus, misschien kortstondig, paren vormen. Zonder dat ze echt helemaal in elkaar opgaan. Deze paren zijn vergelijkbaar met de elektronen-paren, de dansparen in de klassieke supergeleiders zoals ik die eerder beschreef. Vanwege de sterke aantrekkende kracht tussen de gaten en de elektronen, zou deze paarvorming al bij betrekkelijk hoge temperaturen kunnen leiden tot een elektronische samenklontering, in vakjargon zeggen we dat er een Bose-Einstein Condensatie optreedt met als gevolg een macroscopische fase-coherentie, die een essentiële stap zou kunnen zijn voor de supergeleiding [11].

Samen met collega's Alexander Brinkman en Maarten van Zalk proberen we momenteel deze gedachten over paarvorming tussen gaten en elektronen te toetsen aan experimenten en in formules te vatten. Ik moet benadrukken dat dit slechts eerste stappen zijn in een nogal radicaal andere richting dan de bestaande theorieën voor hoge temperatuur supergeleiding, en misschien is het een doodlopend steegje, maar u begrijpt nu wellicht waarom we het wel heel erg spannend vinden om dit pad te verkennen.

Wat we inmiddels wel zeker weten van de hoge temperatuur supergeleiders is dat de supergeleidende toestand essentieel andere eigenschappen heeft dan die in de klassieke supergeleiders, zoals die door Kamerlingh Onnes zijn ontdekt. Dale van Harlingen en collega's aan de Universiteit van Illinois en John Kirtley en Chang Tsuei van het IBM Research Lab in Yorktown Heights, New York, hebben halverwege de jaren negentig ontdekt dat het supergeleidende condensaat in de hoge temperatuur materialen beschreven wordt door een golf functie met een zogeheten d-symmetrie, terwijl voor de klassieke supergeleiders een s-symmetrie geldt [12,13]. Het voert wat te ver om vandaag de finesses van deze golf functie-symmetrieën uit te leggen, maar u mag van mij aannemen dat het een van de meest basale eigenschappen van de supergeleiding is.

Het verschil doet inderdaad vermoeden dat het mechanisme van de hoge temperatuur supergeleiding essentieel anders is dan dat van de klassieke supergeleiders.

'Of particular interest is the question, whether the contact between two superconductors becomes superconducting, too.'

Albert Einstein, 1926. [14]

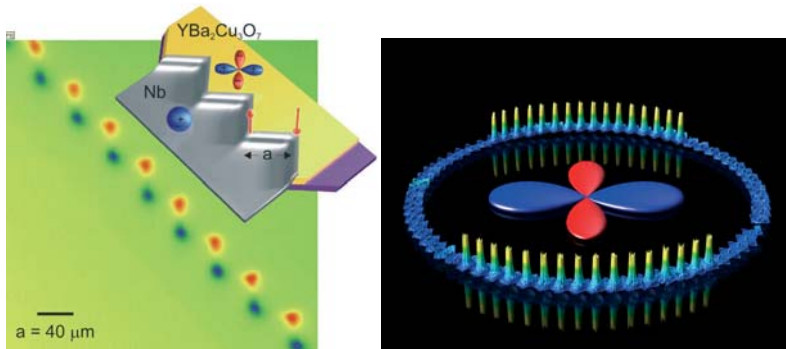
De consequenties van het verschil in symmetrie-eigenschappen tussen de klassieke en de hoge temperatuur supergeleiders worden op fascinerende wijze zichtbaar als we contacten maken tussen deze materialen, zoals bijvoorbeeld tussen niobium en $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$. Maken we deze verbindingen langs een rand van het $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$, dan gedraagt het zich als een volstrekt gebruikelijke supergeleidende kortsluiting, waar je eigenlijk niets bijzonders aan ziet. Maken we echter dit contact om een hoekje van de hoge temperatuur supergeleider dan blijkt dat er ineens een elektrische kringstroom gaat lopen, als een soort wervelwind met de hoek als het middelpunt. Waar een stroom in een kring loopt ontstaat er een magneetveld, en de grootte van dit magneetveld blijkt precies een vaste waarde te hebben, een zogenaamd half flux-quantum.

Ik vind dat fascinerend, je hebt twee materialen die van zichzelf niet magnetisch zijn, je doet er verder niets mee, legt geen stroom aan en geen magneetveld, je koelt ze alleen maar af totdat ze beide supergeleidend zijn en er ontstaat spontaan een magneetveld.

Omdat dit spontaan opgewekte magneetveld direct verbonden is met het bijzondere karakter van de hoge temperatuur supergeleiding, denken we door een nauwkeurige bestudering van dit verschijnsel mogelijk weer iets meer te kunnen leren over het mechanisme van de supergeleiding. Ook zijn we geïnteresseerd in de vraag of we de halve flux-quanta kunnen gebruiken, bijvoorbeeld voor toepassingen in de informatie-technologie.

Om de kleine magneetvelden af te kunnen beelden maken we gebruik van een scanning SQUID microscoop, een variant van de scanning probe microscopie technieken die ik in het begin van mijn oratie introduceerde. Bij de scanning SQUID microscoop wordt een heel klein SQUID, dat was zo'n gevoelige magneetveldsensor, over het oppervlak bewogen, en kan dus een plaatje worden gemaakt van de magneetvelden die op het hoekje tussen de hoge en

lage temperatuur supergeleider ontstaan. Een voorbeeld hiervan zit u in het figuur 11a, dat we in een samenwerking met Kirtley en Tsuei hebben gemaakt.



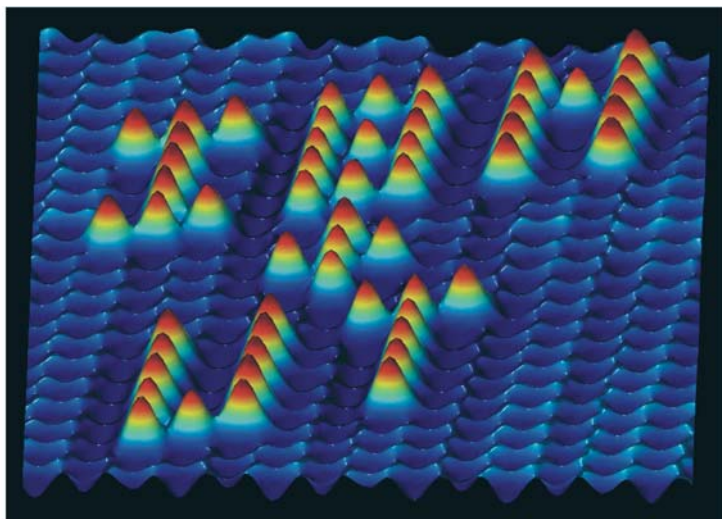
Figuur 11: (a) Afbeelding van halve magnetische flux-quantum, die spontaan worden gevormd op de hoekpunten van een $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ -niobium zigzag structuur [15] (b) Beeld uit een experiment waarbij de formatie van halve flux-quantum nader wordt onderzocht [16]

Een ander voorbeeld, figuur 11b, komt uit een recente studie die we juist deze maand publiceren in het tijdschrift Nature Physics [16]. Hierbij hebben we gekeken bij welke scherpte van de hoek het half flux-quantum effect precies optreedt, en of de grootte van het spontaan geproduceerde magneetveld afhankelijk is van deze hoek.

Bij deze artikelen staan veel namen genoemd van mensen die belangrijke bijdragen aan dit onderzoek hebben geleverd. Op een aantal van deze personen kom ik straks nog terug. In het bijzonder zou ik op dit moment willen noemen de oud-promovendi Henk-Jan Smilde en Ariando, en een huidige promovendus op dit onderwerp, Kees Verwijs. Dit onderzoek wordt gefinancierd door het Ministerie van Onderwijs, Cultuur en Wetenschap via de stichting voor Fundamenteel Onderzoek der Materie (FOM).

Het spontaan gevormde magneetveld kan even gemakkelijk naar boven als naar onder gericht zijn, en zou dus uitstekend als informatiedrager kunnen fungeren. In computertaal, naar boven noem je dan bijvoorbeeld 1 en naar

onder o. Als je de richting van de halve flux-quanten gecontroleerd kunt aanpassen heb je dus de mogelijkheid informatie te schrijven en weer te lezen.



Figuur 12: 'IBM + UT' geschreven in de vorm van halve magnetische flux-quanten in array structuren bestaande uit combinaties van hoge en lage temperatuur supergeleiders.

Een eerste demonstratie hiervan is te zien in figuur 12, zoals die bij IBM in New York is gemaakt. In het kader van het nationale nanotechnologie programma NanoNed doen we momenteel onderzoek, onder andere in samenwerking met de Universiteit van Ilmenau in Duitsland, naar snelle elektronische schakelingen waarin de halve flux-quanten centraal staan [17]. Vanaf begin april zal promovendus Aleksandar Andreski ons team op dit thema versterken.

Het is erg leuk daarbij te kunnen vermelden dat IBM ons recentelijk een scanning SQUID microscoop heeft geschonken, en dat Dr. John Kirtley de volgende drie maanden in onze groep zal komen werken aan de magnetische microscopie aan supergeleiders, maar ook aan andere systemen. Dit is een geweldige toevoeging aan ons al lopende onderzoek aan magnetische microscopie, waarin promovendus Aico Troeman en postdoc Li Xing You een centrale rol spelen.

Om de zojuist beschreven studies aan de hoge temperatuur supergeleiders uit te kunnen voeren speelt materiaalkunde een essentiële rol. We doen onze onderzoekingen aan dunne lagen, en proberen daarbij een zo perfect mogelijke kristalstructuur te verkrijgen, omdat defecten in deze materialen de eigenschappen sterk kunnen beïnvloeden. De vrijwel perfecte groei van dunne lagen van complexe oxiden, waar de hoge temperatuur supergeleiders onder vallen, is één van de bijzondere specialismen van deze Universiteit. Deze methoden zijn begin jaren negentig ontwikkeld binnen de Lage Temperaturen groep van Horst Rogalla, door met name Dave Blank en Guus Rijnders. Vanwege de complexe kristalstructuur bleken de hoge temperatuur supergeleiders de ideale uitdaging voor innovatieve ontwikkelingen in de dunne lagen groei. De kennis opgedaan met de oxidische supergeleiders wordt wereldwijd nu ook bij de ontwikkeling van vele andere materialen toegepast, zoals piëzo-elektrische en ferro-elektrische materialen of optisch transparante elektrische geleiders.

Ook hier in Twente heeft het onderzoek aan oxidische dunne lagen zich uitgebreid in vele richtingen, en ook over meerdere groepen binnen de Lage Temperaturengroep waarvan mijn leerstoel deel uitmaakt, en binnen de Anorganische Materiaalkunde groep waar Dave inmiddels hoogleraar is.

Er bestaat een nauwe samenwerking tussen deze groepen aangaande het onderzoek aan bijzondere elektronische eigenschappen in dit soort materialen, en dan betreft het niet alleen supergeleiding maar ook bijzondere effecten die bij kamertemperatuur optreden. Zo onderzoeken we momenteel de elektrische geleiding die kan plaatsvinden op de grensvlakken tussen twee isolerende materialen, SrTiO_3 en LaAlO_3 [18].

Dergelijke tweedimensionale geleiders zijn van grote interesse als eventuele toekomstige elektronische bouwstenen, zeker als het mogelijk wordt de geleiding gecontroleerd aan en uit te schakelen. Het onderzoek wordt dan

ook financieel ondersteund door Philips. Mark Huijben zal op dit onderwerp eind april promoveren, en verschillende promovendi, onderwie zijn broer Jeroen Huijben, vanuit het MESA+ Research Programma Nanoelectronics, en Gerwin Hassink gaan in de bovengenoemde samenwerking verder op dit onderwerp.

Aan de hand van twee voorbeelden, de hoge temperatuur supergeleiding en de bijzondere eigenschappen van grensvlakken in kristallijne materialen, heb ik u een beeld willen schetsen van bijzondere fenomenen in onconventionele materialen en materiaal-combinaties die ik fascinerend vind en die we hier in Twente erg goed kunnen onderzoeken. Het doel van het onderzoek daaraan is enerzijds een beter begrip te krijgen van de achterliggende fysica van deze fenomenen, en anderzijds ook deze kennis te gebruiken voor nuttige toepassingen. Er komen in dit onderzoek telkens weer nieuwe onderwerpen op, en dat zal ook zeker worden versterkt door de ingebruikname van de scanning SQUID magnetische microscopie opstellingen, die zich uitstekend lenen voor studies aan vele verschillende magnetisch actieve objecten. De steeds verder ontwikkelende mogelijkheden om hele kleine structuren te maken bieden hierbij een uitdagend perspectief. We denken er tevens aan het magnetische microscopie onderzoek uit te breiden naar objecten die we bij kamertemperatuur kunnen onderzoeken, zoals bijvoorbeeld biologische materialen.

Als jongbakken hoogleraar vraag je je regelmatig af hoe je de omstandigheden in je groep zo kunt inrichten dat er succesvol en interessant onderzoek wordt gedaan, dat het goede mogelijkheden biedt voor de persoonlijke ontwikkeling van studenten, promovendi en post-docs en ook een fijne en inspirerende werkomgeving is voor het ondersteunend personeel, zoals technici en secretariaat.

Het is misschien aardig om wat te filosoferen over hoe je dat nu voor elkaar kunt krijgen aan de hand van een leuke analogie, passend voor vandaag, namelijk het groeien van kristallen. Bij kristalgroei kennen we verschillende stadia, beginnend met de nucleatie-fase en dan de groei.

Om een eerste aanzet tot kristalgroei te krijgen moet het basismateriaal aanwezig zijn. Normaal zijn dat de juiste chemische elementen, in dit geval zijn het de mensen. Het gaat erom mensen bij elkaar te hebben die talentvol zijn en die gemotiveerd zijn, ongeacht de functie en de fase van de carrière waar-

in ze zitten, zich in te spannen om er een succes van te maken. Het is een van de belangrijkste opgaven voor de hoogleraar, met ondersteuning van de universiteit en de onderzoeks-financierders, een goed team van mensen te formeren.

Wil je de kans openhouden dat nieuwe interessante onderzoeksrichtingen kunnen ontwikkelen, dan moeten de activiteiten waaraan de energie besteed wordt zich ook daartoe lenen. Als alle omstandigheden worden ingesteld op het bereiken van een bepaald vooropgesteld doel, dan zal dit doel mogelijk gehaald worden, maar zal er weinig ruimte en energie beschikbaar zijn om aan nieuwe richtingen vorm te geven. Dat is natuurlijk een keuze, soms wil je misschien ook een mooi groot één-kristal groeien, waarvan van te voren aardig bekend is hoe het eruit moet komen te zien. Ik vind het zelf echter voorlopig nog interessanter te kijken of we hele nieuwe kristallen kunnen maken, met verrassende eigenschappen. Dus moet je de mensen ook de gelegenheid geven maar eens wat uit te proberen, en creativiteit stimuleren.

Vaak zijn er goede ideeën die na een dag vanzelf weer naar de achtergrond verdwijnen. Een natuurkundige zou dit een fluctuatie kunnen noemen. Maar er zijn ook ideeën die alleen maar aan kracht winnen. In dat geval is het essentieel dat als de onderzoekers zelf in hun idee geloven ze die ook proberen door te zetten. Doen ze dit niet, dan is er geen hoop, en zal het net ontstane kristallietje spoedig worden overgroeid door andere ontwikkelingen. Een hoogleraar moet proberen dit moment te herkennen, en de mensen het vertrouwen geven door te zetten, en waar mogelijk de faciliteiten te helpen organiseren.

Heeft het potentiaal van het nieuwe initiatief zich bewezen, dan is de nucleatiefase afgerond en is er een overgang naar de groeifase. Nog steeds is het kristal fragiel, en kan de groei gemakkelijk worden gehinderd of zelfs afgebroken door externe factoren. Zoals iedere kristalgroeier u zal kunnen vertellen is verwarmen nu beter dan roeren. Goede technische ondersteuning, tijd, en mogelijkheden verschillende dingen uit te proberen kunnen in deze fase erg belangrijk zijn.

Zoals je bij kristalgroei ook vaak ziet, kan er bij verdere doorgroei een opsplitsing zijn in verschillende richtingen. Het materiaal wordt dan polykristallijn. Sommige onderzoekslijnen zullen meer fundamenteel van aard zijn, andere meer toegepast. Sommige richtingen zullen ook sneller kunnen

groeien dan andere, en vaak is er veel interactie aan de grensvlakken. We zijn inmiddels in een stadium aanbeland dat we van echte kristallen kunnen spreken. En vaak geldt: hoe unieker het kristal, des te groter de waarde.

Het is mijn doelstelling over een paar jaar terug te kunnen kijken op een aantal succesvolle 'kristalgroei pogingen'.

Dat is voor mij een opgave, die ik voel als een belangrijke verantwoordelijkheid. Maar ik heb ook zo mijn wensen en verwachtingen ten aanzien van de omgeving waarin dit moet gebeuren.

Zo verwacht ik van de Nederlandse overheid dat ze ruimhartig investeert in de ontwikkeling van kennis en de opleiding van jonge mensen. Het is goed de waarde te beseffen van investeringen die in het verleden zijn gedaan in de Nederlandse wetenschap, niet alleen de afgelopen jaren maar zelfs tientallen jaren geleden of meer, en dat waren ook tijden waarin het geld schaars was.

Ik wens daarbij dat men het belang blijft inzien van een langjarige ontwikkeling van onafhankelijke onderzoekslijnen door vrijdenkende hoogleraren. De zogeheten eerstegeldstroom financiering en de open programma's van NWO, FOM en STW zijn daarbij erg belangrijk. Op het ogenblik zijn 'focus en massa' de buzz-words als het gaat om het Nederlandse wetenschapsbeleid. Inderdaad is een bepaalde kritische massa nodig om de noodzakelijke dure infrastructuur te kunnen bekostigen. Ik wil echter waarschuwen niet te ver door te schieten in de concentratie van onderzoeksgroepen, met als gevaar monoculturen te vormen. Voor zowel opleiding als innovatief onderzoek is een zekere breedte in het spectrum aan onderzoek binnen een universiteit of instituut van groot belang.

Naast 'focus en massa' zou ik vanuit het oogpunt van een wetenschapper ook de woorden 'tijd en continuïteit' willen plaatsen. Aan tijd ontbreekt het ons voortdurend. Nu zal dat altijd wel zo blijven, omdat we toch altijd meer willen dan in vierentwintig uur per dag haalbaar is. Maar er zijn wellicht wat verdere creatieve mogelijkheden te bedenken die tijd sparen en tevens een zekere mate van continuïteit van het onderzoek helpen faciliteren. Zo zou men, in analogie met sommige sporten, het begrip 'geplaatste spelers' kunnen invoeren. Daarbij zou je bijvoorbeeld aan alle hoogleraren of universitair-

re (hoofd)-docenten die in de voorgaande vijf jaar aan bepaalde vooropgestelde criteria hebben voldaan, zoals in totaal meer dan tien artikelen gepubliceerd hebben met een impact factor van drie of hoger, een of meer promotieplaatsen vanuit de tweede geldstroom middelen beschikbaar kunnen stellen zonder dat er een onderzoeksaanvraag voor nodig is. Hiervoor in de plaats zouden zij niet, of beperkt, in de open competitie mogen meedoen, zodat jonge talenten daar niet zo op hoeven te boksen tegen de track records van hun meer seniore collega's.

Van de Universiteit Twente verwacht ik, dat zij in al haar beleid de hoogst haalbare kwaliteit nastreeft. Deze ambitie is ook herhaaldelijk uitgesproken door het College van Bestuur en is van essentieel belang voor het halen van aansprekend resultaat. Ook van de faculteit Technische Natuurwetenschappen en het wetenschappelijk instituut MESA+ verwacht ik dat ze het ambitieniveau dat ze al een aantal jaren met verve etaleren in stand houden. Toponderzoek is een sterke basis voor het inrichten van toponderwijs.

De promovendi en studenten in mijn groep wens ik heel veel succes en plezier toe in hun studie en met hun onderzoek. Geloof in je eigen dromen! Bij goed onderzoek is het onvermijdelijk dat sommige goede ideeën bij nadere beschouwing minder goed blijken te zijn en allerlei experimenten eerst vijf keer mislukken voordat het wel werkt. Dat hoort er gewoon bij, laat je daardoor niet uit het veld slaan. Wees voldoende eigenwijs, maar ook coöperatief en elkaar ondersteunend. Werk hard, maar denk ook aan de andere belangrijke dingen van het leven. En geloof vooral niet alles wat ik zeg!

Dames en heren, ik kom nu bijna aan het eind van mijn oratie, en zou graag een aantal mensen in het bijzonder willen noemen.

Het is voor mij allereerst een bijzonder moment mijn ouders op deze plaats en bij deze gelegenheid te kunnen bedanken. Mijn oratie begon met de woorden 'Bij mijn ouders thuis ..', en daar ligt de basis voor vele ontwikkelingen in mijn verdere leven. En of het nu de lagere school was of de universiteit, altijd was er het warme meeleven en ondersteuning, die ik, samen met Joyce, ook graag aan onze kinderen wil overdragen. Die warme belangstelling geldt ook mijn verdere familie en schoonfamilie en vele vrienden en bekenden, waarvoor ik ook hen heel hartelijk dank.

Met veel waardering noem ik op deze plaats prof. Horst Rogalla, en bedank ik hem hartelijk voor zijn steun over de vele jaren dat we elkaar nu al kennen. Horst kwam zo'n twintig jaar geleden naar Twente, toen de hoge temperatuur supergeleiders net waren ontdekt. Een van de eerste keren dat ik jou zag, Horst, was tijdens jouw oratie, toen ik als derdejaars student ergens achter in de zaal zat. Sinds die tijd kan jij met recht terugkijken op een groot aantal mooie 'kristallen' die onder jouw leiding in de Lage Temperaturen groep zijn ontwikkeld. Dit geldt voor zowel wetenschappelijke ontwikkelingen als ook de vele mensen die uit jouw groep zijn voortgekomen en nu her en der zelf in bedrijfsleven of universiteit belangrijke posities bekleden. Jij bracht ook een verbinding naar de internationale topinstituten naar Twente, en dat was van onschatbare waarde voor de groep, haar medewerkers en studenten en de faculteit als geheel. Voor mij persoonlijk bracht het bijvoorbeeld de ingang bij IBM Zürich na mijn promotie, wat voor mij een geweldige kans was.

Dave Blank en Guus Rijnders heb ik al eerder in mijn oratie genoemd. Zij hebben kristalgroei in dunne lagen vorm tot kunst verheven, door hun geliefde pulsed-laser-depositie methode tot bijna onvoorstelbare perfectie te ontwikkelen. Zoals velen werd ook ik gegrepen door Dave's enthousiasme, en dat heeft mijn werkwijze voorgoed beïnvloed. Ik hoop en verwacht dat we in onze intensieve samenwerking, samen ook met Alexander Brinkman, nog veel mooie resultaten zullen bereiken.

Tijdens mijn studie, promotie en post-doc jaren heb ik veel geleerd van een aantal personen, leermeesters die ieder op hun eigen wijze bouwstenen aan mijn ontwikkeling hebben bijgedragen. Ik noem daarbij met name Gerrit Gerritsma, die ons veel te vroeg is ontvallen, en Jaap Flokstra hier in Twente, en Jochen Mannhart bij IBM Zürich en de Universiteit van Augsburg.

Intensieve samenwerkingen bestaan er o.a. met John Kirtley en Chang Tsuei van het IBM Research Lab in Yorktown Heights. Ook bestaat er een erg plezierige samenwerking met prof. Stephan van Gils van de afdeling Toegepaste Wiskunde, omtrent het modelleren van interacties tussen halve magnetische flux-quanta onderling en met aangelegde elektrische stromen.

Ik bedank de faculteit Technische Natuurwetenschappen, het MESA+ Instituut voor Nanotechnologie en het College van Bestuur van de Universiteit Twente voor het vertrouwen dat zij in mij stellen met deze hoogleraarbenoeming. Zoals gezegd zal ik proberen er iets moois van te maken.

Ik wens mijn collega hoogleraren binnen TNW veel succes toe in hun onderzoek. Er wordt hier in Twente heel veel bijzonder goed onderzoek gedaan, waar we met zijn allen erg trots op mogen zijn.

Een van de bijzondere krachten van onze opleiding is de Technisch Natuurkundige Studievereniging Arago. Het is geweldig wat de studenten die actief zijn in deze club allemaal organiseren, van boekenverkoop, tot symposia en buitenlandse excursies. Zij zijn ook bijzonder actief in de voorlichting en studentenwerving, en in het populariseren van de natuurkunde. Zo kunnen zij u precies vertellen hoe u thuis met een magnetron en een stuk kaas de lichtsnelheid kunt meten, en vergelijkbare belangwekkende zaken.

Er zijn veel collega's binnen en buiten de leerstoel die een grotere pluim verdienen dan ik ze hier in deze korte tijd kan toezwaaien. Naast de personen die ik gedurende de oratie al noemde, denk ik met name aan Dick Veldhuis, Frank Roesthuis, Ans Veenstra en Inke in de Wal, Harrie Steffens, Alexander Golubov, Sybolt Harkema en Wilfred van der Wiel. Ik zou er graag nog veel meer op willen noemen, waarvoor mij op dit moment helaas de tijd ontbreekt, maar iedereen hartelijk bedankt!

Maar bovenal wil ik Joyce bedanken en daarbij ook direct onze kinderen Maartje, Tijmen en onze jongste spruit noemen. De liefde en het enthousiasme van dit 'thuisfront' voel ik als een groot geluk. Met het regelmatige overwerk, de reizen en de spreekwoordelijke verstrooidheid die aan mijn baan verbonden zijn, komt er veel terecht op de schouders van Joyce. Zij vangt dat allemaal op een geweldige manier op, en verdient veel meer dank dan ik in staat ben hier in in een paar woorden uit te drukken.

Voor Maartje en Tijmen is het hele leven 'Fascinerende Materie' en ik wens hen, en hun toekomstige broertje of zusje, van harte toe dat ze dat gevoel altijd zullen blijven behouden.

Dames en heren, het opzetten van een team waarvan bij een terugblik met recht kan worden gezegd: 'Dat was een goede groep mensen en daar gebeurde wat moois'; dat is de opdracht die ik mijzelf meegeef met het aannemen van dit hoogleraarschap.

Ik dank u allen heel hartelijk voor uw komst vandaag en voor uw aandacht.

Referenties:

- [1]: G. Binnig, H. Rohrer, Ch. Gerber en E. Weibel, '7x7 Reconstruction on Si(111) resolved in real space', *Physical Review Letters* 50, 120-123 (1983).
- [2]: G. Binnig en H. Rohrer, 'Scanning tunneling microscopy – from birth to adolescence', Nobel lecture, Stockholm (S), December 8, 1986. *Reviews of Modern Physics* 59, 616-626 (1987).
- [3]: Omicron Nano Technology GmbH, Taunusstein (D).
- [4]: D.M. Eigler en E.K. Schweizer, 'Positioning single atoms with a scanning tunneling microscope', *Nature* 344, 524-526 (1990).
- [5]: J.G. Bednorz en K.A. Müller, 'Possible high Tc superconductivity in the barium-lanthanum-copper-oxygen system', *Zeitschrift für Physik B* 64, 189-193 (1986)
- [6]: H. Kamerlingh Onnes, 'Further experiments with liquid helium, B. On the change of resistance of pure metals at very low temperatures', *Communicatie Nr. 119 van het Natuurkundig Laboratorium Leiden, Verhandelingen van de Koninklijke Akademie van Wetenschappen, Sectie Natuurwetenschappen* 12, 1107-1113 (1911).
- [7]: J.P. Hornak, *The basics of MRI*, Interactive Learning Software, Henrietta, (NY), USA
- [8]: Deze meting is uitgevoerd door Ing. Erik Krooshoop en Dr.Ir. Bennie ten Haken (waarvoor hartelijk dank!), in de SQUID magnetometer opstelling van de Universiteit Twente. Een beschrijving van dit systeem is gegeven in: M.J. Peters, J.G. Stinstra, S.P. van den Broek, J.A.F. Huirne, H.W.F. Quintero, H.J.M. ter Brake en H. Rogalla, 'On the fetal magnetocardiogram', *Bioelectrochemistry and Bioenergetics* 47, 273-281 (1998).
- [9]: M.K. Wu, J.R. Ashburn, C.J. Torng, P.H. Hor, R.L. Meng, L. Gao, Z.J. Huang, Y.Q. Wang en C.W. Chu, 'Superconductivity at 93K in a new mixed-phase Y-Ba-Cu-O compound system at ambient pressure', *Physical Review Letters* 58, 908-910 (1987)
- [10]: A. P. Malozemoff, J. Mannhart en D. Scalapino, 'High-temperature cuprate superconductors get to work', *Physics Today* 58, 41-47 (2005)
- [11]: A. Brinkman en H. Hilgenkamp, 'Electron-hole coupling in high-Tc cuprate superconductors', *Physica C* 422, 71-75 (2005)
- [12]: D.J. van Harlingen, 'Phase-sensitive tests of the symmetry of the pairing state in the high-temperature superconductors - Evidence for $d_{x^2-y^2}$ symmetry', *Reviews of Modern Physics* 67, 515-535 (1995).
- [13]: C.C. Tsuei en J.R. Kirtley, 'Pairing symmetry in cuprate superconductors', *Reviews of Modern Physics* 72, 969-1016 (2000).
- [14]: Uitspraak van Albert Einstein op 11 Maart 1926, ter gelegenheid van de evaluatie van de Physikalisch Technischen Reichsanstalt, Berlin. Zie: U. Kern, 'Forschung und Präzisionsmessung. Die Physikalisch-Technische Reichsanstalt zwischen 1918 und 1948', VHC Weinheim (2003)
- [15]: H. Hilgenkamp, Ariando, H.J.H. Smilde, D.H.A. Blank, G. Rijnders, H. Rogalla, J.R. Kirtley en C.C. Tsuei, 'Ordering and manipulation of the magnetic moments in large-scale superconducting pi-loop arrays', *Nature* 422, 50-53 (2003).
- [16]: J.R. Kirtley, C.C. Tsuei, Ariando, C.J.M. Verwijs, S. Harkema en H. Hilgenkamp, 'Angle resolved, phase sensitive determination of the in-plane gap in $YBa_2Cu_3O_{7-d}$ ', *Nature Physics*, Maart 2006.

- [17]: Th. Ortlepp, Ariando, O. Mielke, C.J.M. Verwijs, K. Foo, H. Rogalla, F.H. Uhlmann en H. Hilgenkamp, 'Flip-flopping fractional flux quanta', Aangeboden ter publicatie aan *Science* (2006)
- [18]: M. Huijben, G. Rijnders, D.H.A. Blank, S. Bals, S. Van Aert, J. Verbeeck, G. Van Tendeloo, A. Brinkman en H. Hilgenkamp, 'Electronically coupled complementary interfaces between perovskite band insulators', Aangeboden ter publicatie aan *Nature* (2006)



Universiteit Twente
de ondernemende universiteit