



Universiteit
Leiden

The Netherlands

Het draait om de spin : over tollende electronen en fundamenteel materialenonderzoek

Aarts, J.

Citation

Aarts, J. (2005). *Het draait om de spin : over tollende electronen en fundamenteel materialenonderzoek*. Faculty of Mathematics & Natural Sciences, Leiden University. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/4450>

Version: Not Applicable (or Unknown)

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

Downloaded from: <https://hdl.handle.net/1887/4450>

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

Het draait om de spin

Over tollende electronen en fundamenteel materialenonderzoek

Rede uitgesproken door

Prof. dr. J. Aarts

bij de aanvaarding van het ambt
van gewoon hoogleraar in de
experimentele natuurkunde
aan de Universiteit Leiden,
gehouden op 22 april 2005

*Mijnheer de Rector Magnificus,
zeer gewaardeerde toehoorders,*

Vandaag wil ik u iets vertellen over tollende electronen of, iets preciezer, over sommige van de vele consequenties die het heeft dat electronen tollen. In het bijzonder wil ik ingaan op bepaalde eigenschappen van vaste stoffen die cruciaal samenhangen met deze rotatie van electronen om hun eigen as, eigenschappen zoals het optreden van magnetisme of van supergeleiding. Dit is het domein van mijn vakgebied, de vaste-stof fysica. Maar ik wil het niet uitsluitend met u over deze fenomenen te hebben. Ik wil ook graag de materialen in het verhaal betrekken waarin de tollende electronen hun kunstjes vertonen, en dan nog een stap verder gaan en beschrijven hoe de combinatie van verschillende materialen kan leiden tot nieuwe verschijnselen. Dit zou zelfs kunnen leiden tot een toepassing van het materiaal, nu of in de toekomst. Over het spanningsveld dat bestaat in dit soort fundamentele materialenonderzoek tussen 'nu' en 'de toekomst' kom ik later nog te spreken.

Eerst echter naar onze tollende electronen. U weet ongetwijfeld dat materie bestaat uit atomen, die op hun beurt zijn opgebouwd uit atoomkernen met protonen en neutronen, en daaromheen de electronen. U weet waarschijnlijk ook dat protonen positief geladen zijn, electronen negatief, en dat men zich een atoom voor kan stellen als een mini-zonnestelsel, waarin planeet-achtige electronen in min of meer vaste banen rond een zon-achtige kern lopen. Dit model van het atoom is nu zo'n negentig jaar oud, en bij het ontwikkelen ervan horen beroemde namen in de natuurkunde, zoals die van Rutherford, Bohr en Sommerfeld [1]. Het wordt standaard onderwezen op middelbare scholen, en je zou kunnen zeggen dat het deel uit maakt van ons cultureel-wetenschappelijke erfgoed, of in modern Nederlands, van de bèta-canon. Zoals hierboven geschetst is het echter toch niet helemaal correct. De banen zijn eerder bollen dan cirkels, maar ook ontbreekt er een belangrijke gedachte, namelijk dat electronen niet alleen om de kern draaien, maar ook om zich zelf. Ook de kern vertoont zo'n zelfrotatie, en in die zin is er alweer een analogie met het zonnestelsel, waar eveneens zon en aarde om hun eigen as draaien.

Het electron is een tol, maar dat is een woord dat buiten Nederland niemand begrijpt [2], en daarom gebruiken we het Engelse woord en zeggen spin. De electron spin is een volstrekt onmisbaar ingrediënt in het model van het atoom, is ook bijna even oud, en allesbepalend voor bijna alle eigenschappen van materie en materialen. Desalniettemin behoort zij niet meer tot de zojuist genoemde standaardkennis, zoals een kleine rondgang langs kennissen uit de niet-natuurkundige hoek leerde. En ook op school komt de spin niet vanzelfsprekend ter sprake. Een mooi onderwerp dus voor deze openbare les.

Waar een atoom een begrip is waarover al in de Griekse oudheid gesproken werd, en zo tastbaar dat het tegenwoordig met onze beste microscopen zichtbaar gemaakt kan worden, daar blijft spin een wat esoterischer karakter behouden. Wat we niet kunnen is een

electron vangen, er met een sophisticated viltstift een stipje op zetten, en dan laten zien dat hij draait. Alle bewijs voor het bestaan van spin, hoe overweldigend ook, is indirect. Eigenlijk is dat wel leuk, want juist het ongrijpbare ervan kan misschien iets van de spanning en fascinatie overbrengen die het beoefenen van de natuurwetenschappen met zich mee brengt. In die zin is het alledaagse en tastbare atoom misschien wel saai-er dan zijn spin. Overigens is de electron spin sterk verbonden met de Leidse natuurkunde, omdat hij in 1925, nu precies tachtig jaar geleden, hier in Leiden werd ontdekt door de theoretisch natuurkundigen George Uhlenbeck en Samuel Goudsmit. Ik kan het verhaal van de ontdekking mooi gebruiken om mijn spin verder bij u te introduceren. Dat verhaal laat zich lezen als een detectiveroman, waarbij een aantal speurders op zoek is naar de dader van onbegrepen uitkomsten van experimenten, en waarbij de uiteindelijke oplossing volgens de beste tradities van verrassende eenvoud blijkt.

Omwille van de tijd zal ik het hier echter andersom vertellen, en eerst de dader beschrijven. U weet al dat hij draait, maar u weet nog niet wat de gevolgen daarvan zijn. Dat zijn er twee. Het eerste gevolg is dat het electron hierdoor een mini- of eigenlijk moet ik zeggen micro-, of zelfs nanomagneetje wordt. U kunt dat wel enigszins begrijpen als u zich realiseert hoe een electromagneet werkt, zo'n van koperdraad gewonden spoeltje zoals dat in de huisbel zit. Als er elektrische stroom door de draad loopt zijn dat bewegende electronen, die elektrische lading transporteren. Deze bewegende elektrische lading wekt een magnetisch veld op dat sterk geconcentreerd wordt door de draad als spoel te wikkelen. Het magneetveld trekt dan de klepel aan, die tegen de bel slaat. Net zo kun je denken dat de roterende lading van het electron een magneetveld opwekt, waarbij de draairichting bepaalt waar de noordpool, en waar de zuidpool van de magneet zal zijn. Helemaal correct is dit beeld overigens niet, maar het helpt het voorstellingsvermogen. Het is wat we wel een klassiek beeld noemen, klassiek in de zin dat er alleen natuurkunde van voor de twintigste eeuw in gebruikt wordt; de natuurkunde van Newtoniaanse appels, Coperniaanse planeten, en de elektrische en magnetische velden van Faraday en Maxwell [3]. Die natuurkunde is echter niet genoeg om atomen en electronen mee te beschrijven. Daarvoor is geen gewone mechanica nodig maar quantummechanica, en ook de relativiteitstheorie van Einstein blijkt onontbeerlijk. Het tweede van de eerdergenoemde gevolgen is dan ook quantummechanisch van aard. Als we rotatie-as gebruiken om de richting van de spin te definiëren, dan zou in het klassieke beeld deze richting alle kanten op kunnen staan. In de quantummechanica echter zijn, zoals de naam al zegt, vele zaken gequantiseerd. Een lichtgolf wordt ineens een lichtdeeltje, waarvan er één of twee of drie kunnen zijn, maar niet anderhalf of twee-en-een-half. Andersom is een electron niet alleen deeltje maar ook golf, en zijn de banen van het electron in het atoom gequantiseerd. Slechts die banen zijn mogelijk waarvan de golflengte van het electron precies past op de omtrek van zijn baan. En ook de spin lijdt onder quantisatie. In plaats van alle mogelijke richtingen van zijn draai- zijn er nog slechts twee, die we spin-omhoog of spin-up, en spin-omlaag of spin-down zullen noemen. In de taal van de quantummechanica, de richting is in principe vrij,

maar steeds als we een meting van deze richting doen vinden we hetzij spin-up, of spin-down. Dit heeft vergaande consequenties, omdat het in wezen de electronen in twee soorten verdeelt, spin-up electronen en spin-down electronen. Ik kan overigens die richting wel veranderen, ik kan van een spin-up electron een spin-down electron maken en vice-versa, maar ik hoef steeds slechts over twee types te denken.

Nu weer terug naar de jaren twintig van de vorige eeuw, toen dit alles nog zo onduidelijk was. Om uit te leggen waarom, moet ik nu de aanwijzingen introduceren waarmee de detective-fysici het moesten doen. Uiteraard waren dat de uitkomsten van experimenten, en de experimenten die volop voorhanden waren, waren die uit de spectroscopie. Spectroscopie maakt gebruik van het feit dat ik zoëven al noemde, namelijk dat er slechts bepaalde banen toegankelijk zijn voor een electron in een atoom. Bij iedere baan hoort een bepaalde energie, en samen met de banen zijn dus ook de energieën gequantiseerd. Om deze energieën te bepalen kun je nu het volgende doen. Je neemt een stof van één soort atomen, bijvoorbeeld natrium, verhit dat tot hoge temperatuur, zodat het een gas is, en bekijkt dan het licht dat door dit hete gas wordt uitgestraald. Dat licht wordt gegenereerd door electronen die door de hoge temperatuur in een baan van hogere energie geraakt zijn dan ze normaal bezetten, dan terugvallen naar hun lagere baan, en het surplus aan energie uitzenden als een lichtdeeltje, een foton, waarvan de energie dus precies bepaald is : het is het verschil tussen de energieën van twee mogelijke electronbanen. De energie komt overeen met een bepaalde kleur, en de lijst van alle uitgezonden kleuren is dus een lijst van alle energie-verschillen die er tussen de verschillende electronbanen kunnen bestaan. Dat is een lange lijst, en als je de regels voor de opbouw van het atoom nog niet kent, is het vervolgens een hele puzzel om te bedenken welke banen en energieën blijkbaar beschikbaar zijn. Gelukkig kan daar nog een extra hulpmiddel voor worden ingezet. Ik vertelde net al dat een bewegende lading een magnetisch veld opwekt, en dat geldt dus ook voor de electronen in hun banen om de kern. Ook zij zijn minimagneetjes. Normaal merk je dat niet, omdat verschillende banen elkaar compenseren, maar door een uitwendig magneetveld aan te leggen kun je de energie van de banen veranderen, en daarmee het spectrum, waardoor extra informatie voor de puzzel ontstaat.

Nu ziet u echter meteen het levensgrote probleem. De detective-onderzoekers weten dat electronen bestaan, ze zien dat deze zich als minimagneetjes gedragen, maar ze weten niet dat er nog een tweede soort minimagneetje aanwezig is, namelijk de spin. Die gooit roet in het eten, versluiert de aanwijzingen, en zorgt er voor dat de spectra ongeveer te begrijpen zijn, maar dat het steeds net niet klopt. En dat is wat in de natuurwetenschappen niet kan. 'Het klopt bijna' staat soms gelijk aan 'het klopt helemaal niet'. In de jaren voor 1925 worden vele spectra gemeten en vele modellen voor het atoom opgesteld die allemaal net niet kloppen [4]. Sommige werken prachtig voor natrium, maar niet voor waterstof. Andere werken prachtig, behalve dat je soms ineens door twee moet delen. En dan wordt het 1925. Het verhaal van de ontdekking van de

spin is op vele plaatsen beschreven, maar ik zal me hier voornamelijk beroepen op de beschrijving van Abraham Pais in zijn onlangs verschenen boek 'The Genius of Science' [5,6]. Een paar van de belangrijke spelers zijn op dit moment de theoreticus Pauli en zijn experimentele collega Stern in Hamburg, Bohr in Kopenhagen, Einstein in Berlijn, en in Leiden de theoretici Lorentz, dan al met pensioen, en zijn opvolger Ehrenfest. Dan is er Goudsmit, op dat moment 23 jaar en assistent van Zeeman in Amsterdam, en Uhlenbeck, 25 jaar, en assistent van Ehrenfest. Uhlenbeck is net terug uit Rome waar hij privé-onderwijzer bij de familie van de Nederlandse ambassadeur aldaar is geweest. Hij weet op dat moment niet veel van atoomspectra, en Ehrenfest vraagt hem zich daarover te laten bijpraten door Goudsmit. In de discussies die zomer wordt het idee van de electron spin met zijn eigen magnetisch moment geboren. Ehrenfest suggereert een kort artikel te schrijven, dat in oktober 1925 gepubliceerd wordt in het tijdschrift *Naturwissenschaften* [7]. Ondertussen wordt de mening van Lorentz gevraagd, die al snel laat zien dat het idee klassiek onmogelijk is : het electron zou veel te snel moeten draaien om het waargenomen magneetveld te genereren. Maar alvorens een nieuwe impasse in kan treden helpt het toeval een handje. Eind 1925 wordt het feit gevierd dat Lorentz 50 jaar eerder promoveerde, waarvoor o.a. Bohr en Einstein naar Leiden komen. In een lichte parafrase op de beschrijving van Pais : "Bohr's trein naar Leiden stopte in Hamburg, waar hij opgewacht werd door Pauli en Stern, die naar het station gekomen waren om te vragen wat hij van de spin dacht. Bohr moet gezegd hebben dat het zeer interessant was, maar dat hij niet begreep waar het magneetveld vandaan kwam dat het electron volgens de spectra zelf leek te voelen. Bij aankomst in Leiden werd hij afgehaald door Ehrenfest en Einstein die hem vroegen hoe hij over spin dacht, en Bohr bracht weer het magneetveld ter sprake. Ehrenfest antwoordde dat Einstein dat opgelost had. Het is een relativistisch effect, waarbij het roterende electron de lading van de kern niet alleen als een elektrisch veld ziet, maar ook als een magnetisch veld. Bohr was meteen overtuigd, en drong er bij Uhlenbeck en Goudsmit op aan dat ze een iets uitvoeriger publicatie zouden schrijven, die vervolgens in *Nature* verscheen [8]. Op de terugweg uit Leiden reisde Bohr via Berlijn. Daar ontmoette hij opnieuw Pauli, die speciaal uit Hamburg gekomen was om te horen wat Bohr nu over spin dacht. Bohr antwoordde dat het een grote vooruitgang betekende." (einde citaat). Het raadsel is opgelost. U ziet dat zelfs zonder internet een doorbraak binnen maanden een feit kan zijn.

Pauli was trouwens nog niet meteen overtuigd, temeer omdat Einstein wel de gedachte voor de oplossing, maar niet de bijbehorende berekeningen geleverd had. Dat werd echter gedaan in de maanden daarna, waardoor bleek dat de nieuwe theorie een verklaring bood voor alle spectra [9]. Het is overigens passend dit stukje geschiedenis af te sluiten met Pauli, die ook in 1925 een minstens zo belangrijke doorbraak tot stand bracht. Hij had al geconcludeerd dat het electron quantummechanisch gezien 'tweeduïdig' moet zijn; iets later zou men zeggen 'alleen spin-up of spin-down kan bezitten'. Vervolgens had hij de regel geformuleerd dat in een bepaalde baan of energietoestand slechts plaats is voor twee electronen, één met spin-up, en één met spin down.

Andersom, en dit heet het Pauli-uitsluitingsprincipe, als er een electron aanwezig is in een bepaalde toestand, dan kan daar alleen nog een electron met een tegengestelde spin bij, maar nooit een electron met dezelfde spin.

Dames en Heren, naast het hopelijk voldane gevoel dat u nu weet wat spin is, kan ik me voorstellen dat er zich ook een licht gevoel van onrust van u begint meester te maken. Het verhaal is nu al enige tijd bezig en we zijn pas gevorderd tot 1925, terwijl u mogelijk gekomen was om iets over modern natuurkundig onderzoek te horen. Simon Carmiggelt schreef ooit een stukje dat dit probleem treffend belicht. Het heette ‘Schrijf nooit een massaspel’, wat de schrijver namelijk juist wel had gedaan voor de 1-mei viering van de toenmalige S.D.A.P. [10]. Het spel behandelde het beknotten der vrijheid door de eeuwen heen, en het stukje luidt “Tegen middernacht waren wij pas bij de Middeleeuwen. Het publiek, begrijpend dat het nog menig eeuwtje voor de boeg had, begon, met het oog op de laatste trams, de hal te verlaten, en ik verzeker u dat men het hóórt, indien zesduizend personen zich mompelend in de richting van de uitgang gaan bewegen.” (einde citaat). Een dergelijk risico wil ik niet lopen, maar alvorens bij dat moderne onderzoek aan te komen moet ik toch nog iets meer zeggen over de manifestatie van spin in materie en materialen. De allerbelangrijkste is overigens indirect. Er kan geen chemische binding, en dus geen materie tot stand komen, zonder dat gebruik gemaakt wordt van de twee spinrichtingen en Pauli’s uitsluitingsprincipe. Als waterstof een molecuul vormt draagt ieder van de twee atomen het éne eigen electron bij aan de nieuw te vormen molecuulbaan, maar ieder met verschillende spinrichting. Zouden die richtingen gelijk blijven, dan zouden de electronen, conform Pauli, zich niet in elkaars baan op willen houden, en zou het molecuul niet gevormd worden. Dit heeft een interessante consequentie : als in de molecuulbaan gelijktijdig een electron met spin-up en met spin-down aanwezig is, dan is netto de spin dus nul. De beide mini-magneetjes heffen elkaar op, en het waterstof molecuul is niet magnetisch. Dit komt voortdurend voor. Koolstof bijvoorbeeld kan vier electronen bijdragen aan bindingen en kan zich daardoor omringen met vier andere atomen, zoals waterstof. Er ontstaan vier bindingen met ieder twee electronen en spinrichtingen, en ook dit CH₄ molecuul is niet-magnetisch. Organische materialen in het algemeen zijn niet geneigd tot magnetisme, en als u hier even over nadenkt is dat maar goed ook. Uw leven zou er heel anders uit zien als u en uw soortgenoten zich als magneten door de wereld moesten bewegen. Het ons welbekende electronicaconcern Philips, daarentegen, is hier toch niet onverdeeld blij mee. Zij willen naar plastic electronica, en zouden ook graag plastic magneten willen kunnen maken [11]. Dat dat niet goed lukt heeft deze fundamentele reden.

Toch kan spin leiden tot magnetisme in een materiaal, omdat chemische binding niet de enige manier is om atomen bij elkaar te brengen. Er is ook de zogenaamde metaalbinding. In de chemische binding houden de electronen de atomen vast door als een soort negatief geladen lijm tussen positief geladen atoomkernen te zitten. Helemaal prettig voelen ze zich met zijn tweeën niet, want elkaar willen ze afstoten, maar de

winst, het molecuul dat gevormd is uit de losse atomen, is energetisch groter dan dit ongemak. Het kan echter ook anders. Als de atomen niet te ver van elkaar zijn, kunnen de electronen er voor kiezen hun banen rond meerdere kernen uit te voeren. Ze zijn dan voortdurend tussen de atomen, maar ze hebben wat meer vrijheid elkaar te vermijden. Deze beweeglijkheid levert ons nog een bonus : door een elektrische spanning aan te leggen, met een batterij bijvoorbeeld, kunnen ze van de hoge spanning naar de lage bewegen zonder dat de binding verloren gaat. Het materiaal geleidt dus een elektrische stroom, en het heet een metaal. Bekende voorbeelden zijn koper, of goud. Maar koper en goud zijn niet magnetisch. Niet zo gek, want de uitgestrekte banen van de electronen leveren geen baanmagnetisme, en er zijn evenveel electronen met spin omhoog als spin omlaag. Dat laatste is echter geen wet van Meden en Perzen, en dus al helemaal geen natuurwet. Net zoals het voordelig kan zijn om de electronenbanen uit te breiden, kan het energetisch voordelig zijn voor het metaal om iets meer van de ene spinrichting toe te laten dan de andere. Het metaal bevordert daardoor dat de electronen, indachtig het Pauli-principe, verder bij elkaar uit de buurt blijven, en wordt dan magnetisch. Dit gaat wel ten koste van bindingsenergie, en deze balans is heel subtiel. Van alle tweeënegentig in de natuur voorkomende elementen zijn er bij kamertemperatuur maar drie spontane magneten, ijzer, kobalt en nikkel [12]. Dit spontane magnetisme wordt ferromagnetisme genoemd wordt, naar ferrum, het latijnse woord voor ijzer. Een vierde element, palladium, komt dichtbij, maar kan de sprong naar ferromagnetisme net niet maken. Door verbindingen en legeringen toe te laten kan dit palet overigens aanzienlijk worden uitgebreid, en dat levert ook een aardige illustratie op van de subtiliteit van de energiebalans. Door bijvoorbeeld 1 % ijzer in palladium op te lossen is het materiaal een ferromagneet als we het afkoelen tot vlak bij het absolute nulpunt, 273 graden onder nul. Al twintig graden daarboven (twintig Kelvin in ons spraakgebruik) wordt het magnetisme opgebroken doordat warmte-energie de balans verstoort. IJzer zelf ondergaat dat lot pas rond 1040 Kelvin, oftewel 770 °C, het magnetisme is hier veel sterker. Dit levert ook een voorbeeld van de maakbaarheid van de functionaliteit van een materiaal, zoals magnetisme. Door het materiaal goed te kiezen kan ieder gewenst sprongpunt gefabriceerd worden.

Magnetisme is een collectieve eigenschap van het electronensysteem. Door het correleren van de banen en spins van alle electronen komt de energetisch voordeligste toestand tot stand, de grondtoestand van het systeem. Het leuke van vaste-stof fysica is dat het grote aantal deeltjes met hun diverse wisselwerkingen tot allerlei verschillende grondtoestanden kan leiden, soms met heel exotische eigenschappen. De meest bekende daarvan is ongetwijfeld supergeleiding, een toestand die in diverse materialen optreedt bij lage temperaturen, en die gekenmerkt wordt door de afwezigheid van weerstand, en dus warmte-ontwikkeling, als er een elektrische stroom door het materiaal gestuurd wordt. U weet waarschijnlijk dat supergeleiding ontdekt werd door Heike Kamerlingh Onnes, hier in Leiden, in 1911, en dat het daarna nog meer dan vijftig jaar duurde voor het fenomeen begrepen werd. U weet mogelijk ook dat in 1987 een hele

nieuwe klasse materialen ontdekt werd met veel hogere overgangstemperaturen, wel tot 150 Kelvin. We weten overigens nog steeds niet hoe dat komt - en daardoor hebben we nog steeds geen supergeleiding bij kamertemperatuur. Voor mijn verhaal wil ik alleen naar de klassieke supergeleiders kijken, en hun grondtoestand contrasteren met die van een magneet. In een supergeleider is het atoomrooster een beetje slapper, waardoor een passerend electron een atoom iets van zijn plaats kan trekken. Hierdoor ontstaat in de buurt van dat electron iets meer positieve lading, wat een tweede electron aantrekt. In feite is nu een electronenpaar gevormd, naar hun ontdekker een Cooper-paar genoemd. En waar enkele electronen in hun reis door het materiaal met regelmaat botsingen ondergaan, en daardoor warmte opwekken, daar blijken de Cooper-paren dit te kunnen omzeilen, omdat ze hun eigen beweging zo kunstig correleren met die van de atomen. Dat werkt natuurlijk niet als de atomen te wild bewegen, bij hoge temperatuur, en daarom wordt klassieke supergeleiding alleen gevonden onder ongeveer 20 Kelvin. Er zitten verschillende interessante aspecten aan supergeleiding, en daarvan wil ik er een paar noemen. De eerste gaat over de spin van de electronen in het Cooper-paar. U heeft ongetwijfeld tot nu toe goed opgelet, u heeft begrepen dat de spin van het electron een cruciale ingrediënt is, en de vraag over de spin heeft zich vast onmiddellijk aan u opgedrongen. Het antwoord is eenvoudig: beide electronen hebben tegengestelde spin. Dat moet ook wel, zou Pauli al gezegd hebben, want met dezelfde spin kunnen ze niet dicht bij elkaar in de buurt zitten, en dat doet de aantrekkende wisselwerking teniet. Dit heeft een curieuze consequentie. Supergeleiding en ferromagnetisme zijn volstrekte tegenpolen. Supergeleiding kan niet bestaan als de electron spins dezelfde kant op wijzen, zoals in de magneet; ferromagnetisme kan niet bestaan als de electronen opgepaard zijn met tegengestelde spins, zoals in de supergeleider. Er bestaan dan ook geen supergeleidende ferromagneten [13].

Een ander aspect van supergeleiding heeft te maken met het feit dat het Cooper-paar niet precies op één positie gelocaliseerd is. Het heeft een zekere uitgestrektheid, wat niet zo vreemd is, want de twee electronen van het paar zitten niet op dezelfde plek, maar alleen in elkaars buurt. Die uitgestrektheid, ook wel de coherentielengte genoemd, kan vrij groot zijn, zeg tien tot honderd atoomafstanden of meer. Aangezien we tegenwoordig materialen dunner kunnen maken dan honderd atoomafstanden, kunnen we dit onderzoeken in experimenten, en misschien zelfs toepassen. Een laatste aspect is misschien wel het meest opmerkelijke. Het blijkt namelijk dat de verzamelde Cooper-paren zich in zekere zin als een enkel deeltje gedragen, een superdeeltje zo u wilt, met alweer een quantummechanisch karakter, zodat het zich ook als een golf gedraagt, en zelfs een golf die zich over macroscopische afstanden, denk aan meters, kan uitstrekken. Supergeleiding is een macroscopisch quantumfenomeen, en dat maakt het extra bijzonder.

Dames en heren, ik heb u dit niet zonder reden verteld. U heeft nu een spoedcursus vaste-stof fysica achter de rug die ik nodig heb om bij modern onderzoek te kunnen

komen. U weet nu ook hoe onze studenten zich soms moeten voelen. Vanaf de atomen op middelbaar-school niveau krijgen zij maar ongeveer drie jaar de tijd om aan te landen op het niveau waarop je kan beginnen met de wetenschap waar ze voor naar een universiteit gekomen zijn. Ze hebben dan nog twee jaar om dat meer en meer zelfstandig te gaan beoefenen. Dat is een krap schema, maar het is haalbaar als alle betrokkenen hard werken. Gelukkig zijn de meeste studenten verre van dom, en goed gemotiveerd, zodat ze na die vijf jaar zowel het handwerk beheersen, als de analytische en abstraherende vermogens hebben opgedaan om hetzij nog een tijd door te gaan in de wetenschap, ofwel op een andere manier een bijdrage te gaan leveren aan onze kennismaatschappij. En dat is hard nodig, zo horen we voortdurend, want aan kenniswerkers gaan we een groot tekort krijgen. Het is voor mij dan ook moeilijk te begrijpen dat deze constatering hand in hand gaat met een gestage afbraak van het onderwijs dat moet voorbereiden op dergelijke opleidingen. En daarbij bedoel ik niet zozeer het kennisniveau waarmee het Voorbereidend Wetenschappelijk Onderwijs (V.W.O.) de toekomstige studenten aflevert, hoewel daar een zeker minimum gehandhaafd moet worden, maar veeleer bepaalde vaardigheden die voor kennisgenererende studies nodig zijn. Het bereidt *minder* voor op wetenschap en hier groeit een aansluitingsprobleem. De nieuwe student werd onlangs door de voorzitter van een landelijke werkgroep die zich hiermee bezig hield omschreven als een 'homo zappius': goed in multitasking, snel verveeld, en met een duidelijk lager abstractieniveau [14]. Binnen onze eigen opleiding rijst ook het beeld dat formules, abstracties en leervermogen meer problemen beginnen op te leveren. Het studiehuis lijkt, althans op het moment, het tegengestelde te bereiken van wat de bedoeling was. Dit laatste wordt door de politiek overigens glashard ontkend. In een schriftelijk interview met het Nederlands Tijdschrift voor Natuurkunde, begin 2004, zei de minister van onderwijs: 'We moeten niet blijven zeggen dat de aankomende studenten tekorten hebben', en even verder, 'Aansluiting is iets wat van twee kanten moet komen' (einde citaat) [15]. Met andere woorden, wat de scholen doen is welgedaan, en als er een probleem is moet dat maar door de universiteit worden opgelost. Afgezien van het feit dat het mij ontgaat hoe je zo een kennissamenleving wilt bouwen, ben ik het hier om nog een andere reden mee oneens. In contacten met aankomende en eerste-jaars studenten blijkt namelijk voortdurend dat die op school vaak duimendraaiend hebben zitten wachten tot ze weer eens aan de slag mogen.

Het gevolg laat zich raden. De universiteit gaat zich mengen in de hogere leerjaren van het V.W.O. We zien opkomst van het Junior College in Utrecht, het bèta-partner project in Amsterdam, of het pre-university college in Leiden, waar in alle gevallen, en op verschillende vakgebieden, extra leerstof aan de betere leerlingen wordt aangeboden, en waarmee de ervaringen overweldigend positief zijn. Mijn conclusie is dat het helemaal niet nodig is om er op school voortdurend de rem op te houden. Ik begrijp deze houding overigens wel. Als opleidingen dat niet doen en niveauverschillen gaan kweken, lopen ze kans dat de rendementscijfers omlaag gaan, waarna de volgende Elsevier enquête de staf breekt over zoveel pedagogische onkunde. Ongedifferentieerd sturen op out-

put is onderwijskundig voornamelijk contraproductief, dat zou eigenlijk geen betoog moeten behoeven. Maar de rem is er, en het wordt nu aan de universiteit overgelaten deze zo vroeg mogelijk te verwijderen. Aangezien we echter met de eindtermen van de universitaire opleiding niet al te veel willen schuiven, rekt dit de organisatie als een harmonica uit. Met dalend budget uiteraard. Mocht u zich afvragen waar het extra geld heen gaat waar steeds sprake van is, dan hoef ik alleen maar de termen 'accreditatie-regels' en 'kwaliteitszorgsystemen' te laten vallen [16]. Want niets maakt de overheid zo schichtig als de gedachte dat weinig geld verkeerd wordt uitgegeven. Het niet schuiven met de eindtermen betreft overigens wel een keuze. De universiteit kan er voor kiezen ook haar eerste fase, de bachelor-fase, lichter te maken. Ik ben blij dat dat niet de keuze van de Leidse universiteit is. De profilering als research universiteit, en het benadrukken van de verwevenheid van wetenschappelijk onderwijs met wetenschappelijk onderzoek betekent een stevig bachelor curriculum, dat eerder neigt naar 'diep' dan naar 'breed'. Dit is mogelijk geen recept om veel studenten binnen te halen, maar dat zou ook niet zozeer het streven moeten zijn. Als het maar de geïnteresseerden en de getalenteerden zijn. Dan nog zal niet iedere potentiële student het werk kunnen of willen opbrengen. Aan ons de taak hen dit in de eerste maanden van de studie duidelijk te maken, hopelijk niet gehinderd door het moeilijk te bevatten feit dat ook onze rendementscijfers gerelateerd worden aan de instroom in september.

Wetenschappelijk onderwijs en onderzoek zijn verweven, en ik keer nu graag naar het onderzoek terug. Het is al weer even geleden, maar ik heb u verteld over spins, over ferromagneten, en over supergeleiders, maar nog niet wat modern onderzoek daaraan kan inhouden. Daarvoor zal ik nu nog één nieuwe term introduceren, namelijk die van 'spintronica'. Wat is spintronica [17] ? Het begrip is natuurlijk afgeleid van het begrip electronica, en electronica houdt zich bezig met het manipuleren van electronen en elektrische stromen door middel van elektrische velden. Het bekende voorbeeld is de transistor, in feite een elektrische schakelaar, die stroom gaat doorgeven als er ergens een elektrische spanning wordt aangeboden. En met elektrische schakelaars kun je ook logische componenten bouwen, waarna de stap naar geïntegreerde schakelingen, chips, en computers, niet meer heel groot is. De werking is dus gebaseerd op het feit dat electron lading heeft, die schakelbaar getransporteerd kan worden. Maar een electron heeft ook een spin. En de spin heeft twee mogelijke instellingen, hij kan 'up' zijn, of 'down'. De spin is dus misschien bruikbaar om informatie te transporteren. Ik kan een spin een richting geven, hem door een draad laten lopen, op een andere plaats vaststellen wat die richting was, en op grond daarvan iets doen. Als we spins kunnen manipuleren zoals we electronen al kunnen, dan levert dat vele nieuwe mogelijkheden voor snelle logische schakelingen in de informatietechnologie. Gelukkig voor de onderzoekers staan we nog erg aan het begin van dit gebied, hoewel er al wat bescheiden successen zijn geboekt. Bijvoorbeeld, er bestaan materialen waarin alleen maar electronen van één spinrichting voorkomen. Als ik twee van die materialen tegen elkaar zet, gescheiden door een hele kleine isolerende barrière, en ik probeer stroom door het systeem te laten lopen, dan

lukt dat alleen als de spinrichting, en dus ook de magnetizatie-richting, aan de ene kant van de barrière dezelfde is als aan de andere kant. Het elektrisch spanningsverschil duwt de electronen door de barrière heen, en het materiaal aan de andere kant laat electronen met dezelfde spin graag toe. Als ik echter met een klein magnetisch veld de spins aan de éne kant anders richt dan die aan de andere kant, dan duwt het elektrisch veld tevergeefs : het materiaal aan de andere kant van de barrière is zeer discriminerend en laat geen electronen toe met een foute spinrichting. Dit is dus weer een schakelaar, maar nu bediend met een magnetisch veld in plaats van een elektrisch veld [18].

Iets dergelijks kan ik nu ook proberen door het combineren van een supergeleider met een ferromagneet, op de volgende manier. Ik neem een dragermateriaal, bijvoorbeeld een stukje silicium, en damp daar in volgorde een dunne laag van een ferromagneet op, vervolgens een supergeleider, en daarna weer een ferromagneet. Van de ferromagneten kan ik weer de richting van de magnetizatie draaien middels een klein magneetveld, en door een kunstgreep zorg ik er voor dat zij niet tegelijk draaien, maar bij verschillende waarden van het veld. Hierdoor heb ik twee mogelijke toestanden. In de éne toestand staan de magnetizatie-richtingen in beide ferromagneten dezelfde kant uit, dus parallel; in de andere toestand, na aanleggen van het schakelveld, zijn ze tegengesteld ofwel antiparallel. Hoe voelt zich nu de supergeleider tussen deze twee ferromagneten ? Het feit dat de beide spins van het Cooper-paar zelf antiparallel staan is nu van wezenlijk belang, evenals het feit dat het Cooper-paar uitgestrekt is over een coherentielengte. Maak ik dan de supergeleider niet meer dan ongeveer een coherentielengte dik, dan voelt het Cooper-paar *tegelijk* beide ferromagneten. Zijn die parallel gemagnetiseerd, dan voelt één spin van het electron-paar zich relatief gelukkig; hij kan geacomodeerd worden in beide ferromagneten. En beide ferromagneten doen hun gezamenlijke best de andere spin te draaien en het paar te breken. Door deze paarbreekende werking wordt de sprongtemperatuur van de supergeleider aanzienlijk verlaagd. Draai ik nu echter de magnetisatie-richtingen in de ferromagneten antiparallel, dan is er voor beide spins van het electron-paar een ferromagnetische laag waar ze zich thuis voelen. De andere laag doet weliswaar pogingen die spin toch te draaien, maar dat maakt minder indruk, en de onderdrukking van de sprongtemperatuur door de ferromagneten is nu aanzienlijk minder. Nu heb ik dus een schakelaar voor superstroom. Door de juiste temperatuur in te stellen en de magnetizatie van één van de ferromagneten te draaien, verander ik de toestand van mijn device van normaal-geleidend naar supergeleidend, ofwel van eindige weerstand naar nul-weerstand. Dit spintronica device, de supergeleidende spin-switch, bestaat nog niet echt, hoewel er recent eerste metingen, met nog slechts zeer kleine effecten, gerapporteerd zijn [19]. Ik heb voornamelijk geschetst hoe het, volgens ons theoretisch begrip van supergeleiding en ferromagnetisme, zou moeten werken [20].

Voor het testen van de theorie komt echter veel kijken. De magneten moeten niet te sterk zijn, maar ook niet te zwak; de grenslagen tussen supergeleider en ferromagneet, slechts atoomlagen dik, moeten niet al te wanordelijk zijn, en de supergeleider moet geen varia-

ties in dikte kennen, wat in praktijk submicron afmetingen voor het device betekent. En pas als we dat onder de knie hebben kunnen we de theorie op haar werkelijke waarde testen. Dit is het werkerrein van de natuurkundige. Principes zijn nog niet echt bekend, de betekenis van metingen wordt slechts gaandeweg duidelijk, en soms blijkt dat we andere effecten over het hoofd hebben gezien. Als we dan alles goed begrijpen en dus ook de mogelijke grenzen van de werkbaarheid en toepasbaarheid in beeld komen raakt het device in het domein van ingenieurs, die meestal in staat blijken die eerdere grenzen nog aanzienlijk op te rekken. Om dit verder te illustreren nog kort een tweede voorbeeld van een spintronisch effect met onze supergeleider-ferromagneet hybrides, een effect waar we de laatste jaren aan gewerkt hebben. Hiervoor nemen we eerst een losliggend supergeleidend ringetje. U zult me wel geloven als ik zeg dat er in dit ringetje, in afwezigheid van magnetische velden, en zonder dat er contacten voor elektrische stroom aan zitten, geen stroom loopt. Nu snijden we het ringetje open, met een spleet van weer niet meer dan enkele tientallen atoomlagen dik, en vullen de spleet met een zwak ferromagnetisch materiaal, bijvoorbeeld een mengsel van 50 % koper en 50 % nikkel. Na afkoelen blijkt er dan ineens spontaan een elektrische stroom in het ringetje te lopen. Nog steeds zonder contacten, toch een stroom. Ik ben bang dat ik u dit fenomeen hier niet uit kan leggen. Het is een manifestatie van dat macroscopisch quantum-karakter van de supergeleiding, waarbij de magnetische laag een verandering teweeg brengt in de golf die er bij hoort, wat in de ringstructuur alleen door een spontane stroom kan worden opgelost. Het is een zeer fundamenteel en zeer fascinerend effect, eerst voorspeld, onlangs gemeten [21]. Geen perpetuum mobile overigens, de energie in dit stroompje wordt in feite opgebracht door de koelvloeistof waar het systeem mee koud gehouden wordt. Wel, zo u wilt, een cryogene batterij. Mocht supergeleidende electronica eendaags toepassingen gaan vinden, dan kan dit effect zeer bruikbaar blijken.

Met het woord toepassing raak ik een heikel punt, maar alvorens daar nog een enkele opmerking over te maken, laat ik eerst een stapje terug doen. Ik heb ons onderzoek aan supergeleider-ferromagneet hybrides in enig detail beschreven, maar het is niet het enige werk dat er in mijn groep gebeurt. Er achter ligt een meer algemene vraagstelling waarvan ik nog kort het perspectief wil proberen te schetsen. In die vraagstelling nemen we de functionaliteit van een materiaal als uitgangspunt, in ons geval dus meestal spin-gerelateerd, en vragen ons af wat voor nieuwe verschijnselen er kunnen optreden als we functionaliteiten combineren, of de vorm van het materiaal veranderen. Dat laatste, die vorm, is erg belangrijk. Dat een mooi kristal niobium een sprongtemperatuur heeft bij negen Kelvin wil niet zeggen dat die laag van tien atomen dik dat ook heeft. Toch is dat wat we nodig hebben, anders werkt onze spin switch niet, daar hebben we immers een dikte nodig van de orde van de coherentielengte. Bij sommige andere materialen die we voor het onderzoek gebruiken speelt die vraag nog harder. Zo werken we met een bepaald type metaaloxides, zogenaamde perovskieten. Dat is een bijzondere klasse van materialen. U kent ze misschien uit de krant, want de beroemde hoge- T_c supergeleiders, met hun sprongpunt bij rond de honderd Kelvin, maken er

deel van uit. Maar er zijn veel meer perovskieten. Ze kunnen geleidend zijn, of supergeleidend; magnetisch en geleidend; of magnetisch en isolerend. Er zijn magneten bij waar slechts electronen van één spinrichting voorkomen, ik noemde die eerder al; en er zijn perovskieten die spontaan een elektrisch veld afgeven in plaats van een magnetisch veld. Qua structuur lijken ze ook nog veel op elkaar, dus ze kunnen makkelijk gecombineerd worden. In feite zijn ze de ideale materialen om nieuwe verschijnselen te onderzoeken door gecombineerde functionaliteiten. We hebben daarom de laatste jaren hard gewerkt aan de vraag hoe de eigenschappen van dit soort perovskieten verandert als we ze als dunne lagen deponeren. We hebben bijvoorbeeld geleerd dat de magneten erg veranderen als we de laag groeien op een substraat, waar de atomen een iets grotere afstand tot elkaar hebben. De groeiende laag wordt daardoor opgerekt, en het magnetisch sprongpunt schuift naar aanzienlijk lagere temperatuur [22]. Dat lijkt jammer voor de functionaliteit, maar het opent wel de zeer interessante mogelijkheid om binnen één en dezelfde laag hele kleine gebiedjes te proberen te maken waar de structuur niet onder spanning staat, en waar het magnetisch sprongpunt weer hoog is. Het zou dan mogelijk zijn om magnetische dots te creëren met afmetingen van misschien wel minder dan tien nanometer; waarvan er dus honderdduizend op een millimeter passen. Hier doen we aan nanowetenschap, voordat het nanotechnologie wordt. Want de fundamentele vraag die we eerst weer moeten beantwoorden is of de electronen en hun spins zich in zo'n klein gebiedje anders gedragen dan als het materiaal nog macroscopisch van afmeting is. Ook experimenteel is dit een uitdagende vraag. Je moet het kunnen maken, maar je moet het ook kunnen meten. Hiervoor ontwikkelen we gestaag nieuwe technieken, met als belangrijkste uitgangspunt de zogenaamde scanning tunnel microscoop. Over het principe daarvan zal ik nu niet uitweiden, maar het stelt ons in staat de electronische eigenschappen aan het oppervlak van onze dunne laag met bijna atomaire precisie op te meten. Het is precies wat we nodig hebben voor onze magnetische nanodots, en het maakt ook mogelijk al weer verder te denken : misschien kunnen we in plaats van dunne lagen ook wel dunne draden maken, nanodraden, met nog andere eigenschappen. Het moge duidelijk zijn, gedreven door onze wetenschappelijk nieuwe nieuwsgierigheid kunnen we nog wel even voort.

Of dat genoeg is om het onderzoek te legitimeren is een andere vraag. Hier wil ik graag nog iets over zeggen, en dat koppel ik aan de vraag, hoe moet je het soort onderzoek duiden dat ik net beschreven heb ? Ik noem het graag fundamenteel materialenonderzoek. We onderzoeken fundamentele verschijnselen die gekoppeld zijn aan diverse materialen, hun vorm, en hun combinaties. We werken niet direct aan de toepassing, we vragen ons bijvoorbeeld zelden af of onze fabricagetechnieken ook massaproductie toe zouden laten, maar de toepassing ligt ook niet oneindig ver weg. Afhankelijk van de stand van de technologie is, wat nu niet kan, misschien over tien jaar wel standaard. Het verbaast me dan ook wel eens dat fundamenteel materialenonderzoek door het vigerende onderzoeksbeleid wat stiefmoederlijk behandeld wordt. Dat beleid wordt niet door de universiteit gemaakt. Die beschikt namelijk niet over voldoende middelen om een onder-

zoeksproject te laten uitvoeren. De financiële ondersteuning van een universitaire onderzoeksplaats is min of meer toereikend om experimenten met vloeibaar helium te doen, maar dan is er nog geen voltmeter gekocht of een preparaat gemaakt. Dat laatste moet niet onderschat worden. Wij spreken vrij achteloos over het vermogen om atoomdikke lagen van willekeurige materialen op elkaar te stapelen en submicron structuren te fabriceren, maar dit vereist gespecialiseerde apparatuur, en die is niet goedkoop, noch in aanschaf, noch in onderhoud. Het geld hiervoor komt van de overheid via de Nederlandse Organisatie voor Wetenschappelijk Onderzoek, met voor de natuurkunde als organisator de Stichting voor Fundamenteel Onderzoek der Materie, in de wandeling FOM geheten. Fundamenteel klinkt goed, maar lange jaren was men binnen FOM geneigd om het fundamentele zeer zwaar te laten wegen en het materiaal te beschouwen als een onvermijdelijk vehikel dat afbreuk doet aan wat een prachtig modelsysteem had kunnen zijn. Enigszins gechargeerd uiteraard, omwille van de duidelijkheid [23]. Maar dat zou dan nu toch over moeten zijn? Nieuwe materialen staan aan de bron van toepassingen, en dus aan de bron van innovatie en delen van de kenniseconomie. Toch rijst er nu een nieuw probleem. Om te beginnen blijkt uit de FOM-strategienota voor de periode 2004 - 2010 een verwachte daling van het budget van 14 % [24]. Keuze voor andere kennis blijktbaar, waar misschien wel begrip voor is op te brengen. Natuurkunde is tenslotte niet het enige vak dat voor wetenschappelijke en technologische vooruitgang zorgt, zeker niet met de sterke opkomst van de levenswetenschappen.

Maar binnen dit dalende budget worden ook de accenten sterk verlegd. De nadruk moet komen op onderzoek samen met industriële partners, en op aantoonbare toepassingsgerichtheid. En hier gaat de schoen wringen. Industriële partners kijken anders tegen onderzoek aan. De tijdschijf is kort, de vraag vaak concreet. Een onlangs goedgekeurd 'industriële-partnership programma' behelst het verbeteren van multi-laags-röntgenspiegels voor lithografie-toepassingen. Zoals het voorstel zegt, de multi-laag-fabricage wordt goed beheerd, en hoge reflectiviteit wordt al gehaald, maar commerciële toepassingen vereisen nog majeure verbeteringen in levensduur en procesbeheersing [25]. Met alle respect voor de ingenieuze oplossingen die hiervoor nodig zullen zijn, er wordt niet naar fundamenteel andere oplossingen gezocht, dit is wat ik eerder het domein van de ingenieurs noemde. En nog steeds zeg ik niet dat hier geen geld voor zou moeten zijn. Het vreemde is echter dat hier al een kanaal voor was, de Stichting Technische Wetenschappen, met precies deze missie, en een eigen budget, die nu rechts wordt ingehaald door de Stichting voor Fundamenteel Onderzoek der Materie. U begrijpt mijn zorg. Voor mijn spintronische nanodraden is het al moeilijk in Nederland een industriële partner te vinden; voor welk onderzoek dan ook waar supergeleiders gebruikt worden is dat, alweer in Nederland, vrijwel uitgesloten. Devices met supergeleiders worden niet geacht de toekomst te zijn. Zelfs al wilt u over een paar jaar uw familiefeestjes in de vorm van virtuele drie-dimensionale videoconferenties houden, dan nog is het moeilijk voorstelbaar dat u daarvoor met regelmaat een vaatje helium in uw woonhuis-communicatiecentrum zult gieten. Dit lijkt me echter geen

valide argument. Technologische ontwikkelingen op andere gebieden kunnen dit soort versimpelde gedachtengang onverwacht snel onderuit halen. Zo zijn er de laatste jaren koeltechnieken ontwikkeld die het mogelijk maken bij heliumtemperatuur te komen zonder één druppel koelvloeistof te gebruiken. Een stopcontact is voldoende, een kleine generator doet de rest [26]. Misschien nog steeds niet geschikt voor uw huiskamer, maar wel degelijk voor computercentra, vliegvelden, of andere plaatsen waar hoge eisen aan datastromen gesteld worden. Supergeleidende electronica is misschien minder ver weg dan het lijkt. Fundamenteel materialenonderzoek kan hier, en op tal van andere plaatsen, een grote rol spelen. De industriële agenda is hiervoor echter te veel korte-termijn en beperkt. Om eens uit een ander vakgebied te putten, de laser is niet uitgevonden bij het zoeken naar een vervanging voor gloeilampen. In het totaal aan uitgaven voor research en development in Nederland is het juist de industrie die achterblijft [27]. En waar meer en meer beleid er nu expliciet op gericht wordt om economische waardecreatie en doorwerking naar de markt te bevorderen, zie de recente voorstellen voor de zogenaamde smart-mix gelden, daar zou het niet zo moeten worden dat het afkalkende budget voor fundamenteel gekleurd onderzoek nu ook verkapt voor dat gat gaat worden ingezet.

Hoe dit verder gaat zal moeten blijken. Het zal in ieder geval mijn nieuwsgierigheid naar het gedrag van electronenspinnen in materialen niet onderdrukken. Want eigenlijk draait het toch allemaal om de spin.

Hiermee kom ik aan het einde van mijn verhaal, en wil ik graag nog enkele persoonlijke woorden spreken.

Allereerst wil ik u, Mijnheer de Rector Magnificus en Leden van het College van Bestuur, danken voor het vertrouwen dat u mij geeft bij mijn benoeming tot hoogleeraar in de experimentele natuurkunde.

Leden van het Leids Instituut voor Onderzoek in de Natuurkunde, Enige tijd geleden was er een moment van keuze; in Leiden blijven of elders het onderzoek voortzetten. Wat toen zwaar telde, en nog telt, is de enthousiaste en stimulerende sfeer, de collegialiteit, de gestage vernieuwing, en de open en transparante manier waarin we binnen het instituut met elkaar om gaan. Ik hoop hier naar vermogen aan bij te kunnen blijven dragen

Hooggeleerde De Boer, beste Frank, en hooggeleerde De Châtel, beste Peter, Bij jullie heb ik als promovendus het vak geleerd. Het plezier dat ik in die tijd ervoer heeft belangrijk bijgedragen aan de keuze voor een verdere loopbaan in de natuurkunde.

Hooggeleerde Kes, beste Peter, Jou ben ik zeer dankbaar voor de stimulerende manier waarop je mij van het begin van mijn aanstelling in Leiden tegemoet bent getreden. Naast een groot respect voor je ken-

nis van de supergeleiding heb ik ook groot respect voor de manier waarop je wetenschap en management, zowel formeel als informeel, weet te verenigen.

Met vele collega's heb ik waardevolle discussies gevoerd, en ik wil met name noemen Poul Larsen, van het Philips Natuurkundig Laboratorium, Alexander Golubov van de Universiteit Twente, Henny Zandbergen van de Technische Universiteit Delft en Gé Nieuwenhuys, uit onze eigen werkgroep. Ik heb veel geleerd van hun specifieke expertises. En aangezien de wetenschap het niet van discussies alleen kan hebben, wil ik hier ook graag Ruud Hendrikx en Marcel Hesselberth noemen; zonder hun technische steun zou er de afgelopen jaren veel minder bereikt zijn.

Dames en Heren Promovendi en Studenten,

ik heb al eerder aangegeven dat u weinig tijd gegund wordt om het wetenschappelijk handwerk onder de knie te krijgen. Dat geldt eerst bij de studie, later bij het uitvoeren van onderzoek dat tot een promotie kan leiden. En hoewel wetenschap tegenwoordig teamwork is, wil ik graag uw eigen verantwoordelijkheid in het proces benadrukken. Als het goed is stelt ú de vragen, zwengelt ú de discussie aan, en bent ú niet tevreden met halve antwoorden. Is dat het geval, dan verheug ik mij op een inspirerende samenwerking.

Tot slot een woord voor mijn ouders, voor alle mogelijkheden die ze mij hebben geboden en hun altijd aanwezige steun. Ik ben bijzonder blij dat jullie hier vandaag aanwezig kunnen zijn. En een laatste woord voor Nicolet, die naast haar eigen werk ook altijd nog tijd vindt om mij en mijn werk moreel en praktisch te steunen [28].

Ik dank u allen voor uw aanwezigheid en uw aandacht.

Ik heb gezegd.

Referenties

1. De historie van het atoommodel is in feite iets gecompliceerder. Het electron werd in 1899 ontdekt door Thomson, maar het neutron pas in 1932 door Chadwick. De eerste atoommodellen gingen wel uit van een positief geladen kern, maar veronderstelden dat deze kern bestond uit protonen en electronen. Een goede beschrijving van de geschiedenis is te vinden in het boek van A. Pais, *'Inward Bound'*, Oxford University Press, 1986, ISBN 0-19-851971-0.
2. Het woord voor tol in het engels is *top*; in het frans *toupie*; in het Duits *Kreisel*.
3. Het is aantrekkelijk en klassiek, maar niet correct te denken dat de draaiende lading van het electron het magnetisch moment veroorzaakt. Beter is het er van uit te gaan dat elementaire deeltjes verschillende basiseigenschappen bezitten, zoals massa, lading en spin. Deze eigenschappen bepalen dan het magnetisch moment. Voor het electron werd dit uitgewerkt door Dirac in 1928. Een neutron heeft geen lading maar wel spin, en ook een magnetisch moment. Dat magnetische moment (en ook het magnetische moment van het proton) is echter veel kleiner dan dat van het electron, en speelt geen rol in de magnetische eigenschappen van materialen.
4. Een gedetailleerde beschrijving van de problemen bij het ontrafelen van spectroscopische gegevens is gegeven door S. Tomonaga in *'The story of spin'*, The University of Chicago Press, 1997, ISBN 0-226-80794-0.
5. A. Pais, *The Genius of Science*, Oxford University Press, 2000, ISBN 0-19-850614-7; zie het hoofdstuk over Uhlenbeck, p. 289.
6. Het essay van Pais geeft verschillende referenties naar verslagen van direct betrokkenen. Zie met name G. E. Uhlenbeck, *Physics Today*, June 1976, 40; S. Goudsmit, *Ned. Tijdschr. voor Natuurkunde* 37, 386 (1971). Dit laatste betreft een transcriptie van zijn rede op het jubileumcongres van de Ned. Nat. Vereniging en is vertaald in het tijdschrift *Delta* (1972); en in *'Foundations of Modern EPR'*, edited by G.R. Eaton, S.S. Eaton, and K.M. Salikhov (World Scientific, Singapore, 1998)(zie ook : <http://www.lorentz.leidenuniv.nl/history/spin/spin.html>). Zie verder *'Oude en nieuwe vragen der Natuurkunde'*, rede uitgesproken door G. E. Uhlenbeck bij zijn benoeming tot buitengewoon hoogleraar, in Leiden (de Lorentz leerstoel) in 1955.
7. G. E. Uhlenbeck en S. Goudsmit, *Naturwissenschaften* 13, 953 (1925).
8. S. Goudsmit en G. E. Uhlenbeck, *Nature* 117, 264 (1926).
9. L. H. Thomas, *Nature* 117, 514 (1926).
10. S. Carmiggelt in *'Allemaal Onzin'*, Arbeiderspers, Amsterdam, 1947.
11. Hetzelfde argument geldt voor de covalente bindingen in halfgeleiders zoals Si en GaAs, en het bemoeilijkt de integratie van magnetisme met de (Si-gebaseerde) halfgeleidertechnologie.
12. Er is nog een ferromagnetisch element, gadolinium, met zijn sprongpunt bij 293 Kelvin (20 °C). Het magnetisme wordt daarin echter niet opgewekt door de electronen die de metaalbinding vormen (zogenaamde itinerante electronen), maar door de veel sterker gelocaliseerde electronen uit de 4f-schil.

13. Dergelijke absolute uitspraken zijn meestal onjuist, zo ook deze. Er zijn verschillende verbindingen waarin zowel itinerante als gelocaliseerde electronen voorkomen, die coëxistentie van supergeleiding en ferromagnetisme vertonen. Een voorbeeld hiervan is de verbinding ErRh_4B_4 ; zie Ø. Fischer in *'Ferromagnetic Materials'*, Ch. 6, 465; eds. K. H. J. Buschow and E. P. Wohlfarth, North-Holland, 1990.
14. Ned. Tijdschr. voor Natuurkunde, jaargang 70, 418 (2004).
15. Ned. Tijdschr. voor Natuurkunde, jaargang 70, 30 (2004).
16. Zie het artikel *'Er wordt wel bezuinigd op onderwijs'*, W. Groot en H. Maassen van den Brink, Volkskrant, 5 maart 2005. Hierin wordt geschat dat de uitgaven per student in het wetenschappelijk onderwijs als aandeel van het Bruto Nationaal Product meer dan gehalveerd zijn in de periode 1980 - 2000. Voor de universiteiten zullen tussen 2004 en 2007 de inkomsten per student met 3,6% dalen. Toegezegde extra middelen zijn, volgens de auteurs, gebonden aan extra taken zoals 'deregulering, autonomie en rekenschap', waarvan accreditatieregels en kwaliteitszorgsystemen deel uitmaken.
17. Zie bijvoorbeeld S. A. Wolf, D. D. Awschalom, R. A. Buhrman, J. M. Daughton, S. von Molnar, M. L. Roukes, A. Y. Chtchelkanova, and D. M. Treger, *Science* **294**, 1499 (2001); D. D. Awschalom, M. E. Flatté and N. Samarth, *Scientific American*, June 2002.
18. Deze zogenaamde magnetische tunneljuncties zijn serieuze kandidaten voor magnetische geheugens (MRAM). Zie W. H. Butler and A. Gupta, *Nature Materials* **3**, Dec. 2004, p845.
19. J. Y. Gu, C.-Y. You, J. S. Jiang, J. Pearson, Ya. B. Bazaliy, and S. D. Bader, *Phys. Rev. Lett.* **89**, 267001 (2002).
20. A. I. Buzdin, A. V. Vedyayev, and N. V. Ryzhanova, *Europhys. Lett.* **48**, 686 (1999); L. R. Tagirov, *Phys. Rev. Lett.* **83**, 2058 (1999).
21. A. Bauer, J. Bentner, M. Aprili, M. L. Della Rocca, M. Reinwald, W. Wegscheider, and C. Strunk, *Phys. Rev. Lett.* **92**, 217001 (2004).
22. Z. Q. Yang, R. Hendrikx, J. Aarts, Y. L. Qin and H. W. Zandbergen, *Phys. Rev. B* **70**, 174111 (2004).
23. Het accent op het werken met modelsystemen maakt deel uit van wat wel de 'Dutch Paradox' genoemd wordt : Nederland bereikt een hoog internationaal niveau in de natuurkunde, maar plukt daar economisch weinig vruchten van. Zie T. Klapwijk, *Ned. Tijdschr. voor Natuurkunde*, jaargang 70, 268 (2004).
24. Strategisch plan FOM / GBN 2004-2010 (FOM 04.0526/D), paragraaf 'inkomstenperspectief', p26. Te vinden op de website www.fom.nl.
25. Dit betreft het Carl Zeiss / FOM programma I10, 'Extreme UV multilayer optics'. Voor een beschrijving, zie de website www.fom.nl.
26. Ik doel hier op het principe van 'pulse-tube refrigeration', een koelmethode die werkt zonder koelvloeistof of bewegende delen (althans bij lage temperatuur), en waarmee het tegenwoordig mogelijk is de temperatuur van vloeibaar He (4.2 K) te bereiken. Zie A. T. A. M. de Waele, *Physica B* **280**, 479 (2000).

27. Cijfers in de economie zijn niet altijd even eenduidig als in de natuurkunde. De uitgaven voor Research en Development (R&D) ‘met eigen personeel’ van Nederlandse bedrijven daalde in 2002 met 3,6%, na in een aantal jaren daarvoor met rond de 7% per jaar gestegen te zijn. Anderzijds liggen de R&D uitgaven van de private sector in Nederland met 1,0% van het bruto binnenlands product (BBP) duidelijk lager dan gemiddeld in de Europese Unie (1,2%) of in de Organisatie voor Economische Samenwerking en Ontwikkeling (OESO, 1,5%). Voor het totaal aan R&D (inclusief universiteiten en research instituten) is in 1999 een dalende trend ten opzichte van het EU-gemiddelde ingezet. De Europese ‘Barcelona-doelstelling’ uit 2002 om in 2010 te komen tot gemiddeld 3% van het BBP voor alle R&D, waarvan twee-derde privaat gefinancierd, lijkt verder weg dan ooit.
Bron : ‘Kennis en Economie 2004’, uitgave van het Centraal Bureau voor de Statistiek (2005). CBS-productnummer: 0515905010; ISBN 903572579 4.
28. Mark, woorden verdwijnen, maar voetnoten blijven bestaan. Deze laatste is voor jou, omdat je me er met regelmaat aan herinnert dat het leven niet hoeft te bestaan uit alleen werken. En het juiste soort (leuke) afleiding komt dat werk tenslotte ook ten goede.