

Bouwen in Schrödinger's wereld

Rede uitgesproken door

J.M. van Ruitenbeek

bij de aanvaarding van het ambt
van bijzonder hoogleraar in de
experimentele natuurkunde aan
de Universiteit Leiden
gehouden op 2 mei 2000.



*Mijnheer de Rector Magnificus,
Leden van het Curatorium van deze leerstoel,
Zeer gewaardeerde toehoorders,*

Een van de grootste natuurkundigen van de twintigste eeuw, Richard Feynman, stelde zijn gehoor eens de volgende vraag. Stel dat we van al onze wetenschappelijke kennis slechts één zin mogen doorgeven aan komende generaties, wat zou die zin dan moeten zijn?

Feynman's eigen antwoord was, "Alles is opgebouwd uit atomen."¹

In onze ogen komt deze zin bijna triviaal over. De wetenschap dat alle materie om ons heen uit atomen bestaat maakt sinds lang deel uit van de standaardbagage van elke middelbare scholier. Toch was dit inzicht slechts een eeuw geleden nog onderwerp van heftige debatten. Het is boeiend om te lezen hoe het al dan niet bestaan van atomen filosofen en wetenschappers vele eeuwen heeft bezig gehouden.

Het begrip atoom is al ontstaan in de Griekse oudheid, waar filosofen als Leucippus en Democritus ongeveer 400 jaar voor het begin van onze jaartelling, het standpunt verdedigden dat het niet mogelijk kan zijn om een stuk materie oneindig in tweeën te blijven delen. Zij stelden voor dat wanneer men dit delen in de praktijk zou kunnen brengen, men uiteindelijk een deeltje zou aantreffen, het atoom, dat alle eigenschappen van de stof in zich draagt, maar dat zelf ondeelbaar is.

Sinds de dagen van Democritus tot aan het eind van de negentiende eeuw zijn er onder natuurfilosofen en natuurwetenschappers fervente voorstanders en tegenstanders van dit wereldbeeld geweest. Zo had Ludwig Boltzmann, die leefde van 1844 tot 1906, een indrukwekkend theoretisch bouwwerk geconstrueerd, waarmee hij op grond van de hypothese van het bestaan van atomen een microscopische verklaring gaf voor de warmteleer en transportverschijnselen.² Zijn werk werd echter bekritiseerd door veel machtiger mannen uit die tijd, waaronder Ernst Mach, die het bestaan van atomen in twijfel trokken. In 1903, aan het eind van zijn loopbaan als natuurwetenschapper, wordt Boltzmann in Wenen benoemd tot hoogleraar in de filosofie van de natuurwetenschappen. In zijn inaugurale rede zegt hij het volgende,³

"We weten precies wat we bedoelen met de vraag of een griffioen, een eenhoorn, of een broer van mij bestaat. Echter, wanneer we geheel

nieuwe ideeën vormen, zoals die van ruimte, tijd, atomen, de ziel of zelfs God, weten we dan, ..., wat wordt bedoeld met de vraag of deze dingen bestaan?"

Einde citaat.

Ik vind het zeer opmerkelijk dat de man die zijn hele wetenschappelijk werk gebaseerd heeft op het concept van atomen, er blijkbaar vanuit gaat dat het al dan niet bestaan van atomen ontoegankelijke is voor empirische toetsing.

Maar dan komt Einstein. In een brief van 13 september 1900 aan zijn toekomstige echtgenote, Mileva Maric, schrijft hij over een boek van Boltzmann dat hij aan het lezen is,⁴

“De Boltzmann is fantastisch. Ik heb het bijna uit. Hij weet het meesterlijk uiteen te zetten. Ik ben er vast van overtuigd dat de uitgangspunten van de theorie juist zijn, hetgeen betekent dat ik ervan overtuigd ben dat, in het geval van gassen, we werkelijk te doen hebben met discrete massa punten van duidelijk bepaalde eindige afmeting...”

Einde citaat.

Einstein gaat vervolgens met deze theorie aan de slag en in 1905 verschijnt zijn artikel, vrijwel gelijktijdig met nog drie andere baanbrekende publicaties van zijn hand. Hierin geeft hij een verklaring voor de waarneembare Brownse beweging van stofdeeltjes in termen van fluctuaties in het aantal gasatomen dat op elk gegeven tijdstip van alle kanten tegen het stofdeeltje botst. Hij slaagt erin een nauwkeurige berekening te maken van de afmeting van atomen. Het is daarom vrijwel exact een eeuw geleden dat men ontdekte dat atomen werkelijk bestaan en dat ze kunnen worden waargenomen.

In de loop van de twintigste eeuw zijn atomen tot een algemeen aanvaarde tastbare realiteit geworden. Geen realiteit van de orde ruimte, tijd, ziel of God, zoals Boltzmann het uitdrukte, maar een realiteit van de orde broer, boterham of baksteen. Toch kunnen we ze nog steeds niet zien, in de gebruikelijke zin van het woord. Hun afmeting, ongeveer drie tiende van een miljoenste millimeter, is veel kleiner dan de golflengte van het zichtbare licht, waardoor het onmogelijk is ze met optische middelen zichtbaar te maken.

Er zijn tegenwoordig echter vele instrumenten beschikbaar waarmee atomen kunnen worden waargenomen, en andere waarmee het zelfs mogelijk is individuele atomen te vangen en te manipuleren. Het instrument bij uitstek dat

atomen in de meest letterlijke zin tastbaar heeft gemaakt is de zogenaamde 'rastertunnelmicroscop'. Ik zal dit instrument en zijn mogelijkheden wat uitgebreider bespreken, maar voordat ik hieraan begin wil ik eerst geleidelijk met U afdalen van de macroscopische schaal van de wereld waarin wij leven, naar de microscopische schaal van de atomen.

In de afgelopen decennia zijn diverse fysische en chemische technieken ontwikkeld om op gecontroleerde wijze structuren te bouwen van zeer kleine afmetingen. Gebruikmakend van een combinatie van deze technieken is het nu mogelijk het gedachte-experiment van Democritus en zijn tijdgenoten, vrijwel letterlijk uit te voeren. We kunnen de materie opdelen in steeds kleinere partjes, en afdalen naar het laatste ondeelbare partje: het atoom. Laten we dan als voorbeeld een blokje goud nemen, zeg een kubusje met een ribbe van één centimeter, en dit in tweeën delen, vervolgens de resulterende helften op hun beurt halveren, en zo verder.

Laten we deze weg in gedachten bewandelen. Deze onderneming zou niet de moeite waard zijn wanneer we onderweg niets bijzonders zouden tegenkomen, en het atoom inderdaad niets meer is dan de kleinste afmeting van het metaal goud dat alle eigenschappen van het metaal in zich draagt, maar zelf ondeelbaar is. We zullen zien dat de natuur in werkelijkheid veel rijker is.

De eerste duizend maal delen brengt ons op het niveau van een kubieke millimeter. Op dit niveau nemen we in géén van de ons bekende eigenschappen van goud enige verandering waar. De blokjes zijn inderdaad nog macroscopisch, en maken deel uit van de vertrouwde dagelijkse wereld. Of een stuk metaal een afmeting heeft van kilometers of millimeters maakt voor de materiaaleigenschappen niets uit.

Na nog eens een miljard maal delen van elk van deze blokjes belanden we op het niveau van een kubieke micrometer. Onder een zeer goede microscoop zijn de deeltjes nog net zichtbaar als een stipje. De vorm kunnen we echter niet meer zien, omdat de golflengte van het licht ongeveer even groot is als de afmeting van het gouddeeltje. Dat is klein, maar het is nog altijd vele miljarden malen groter dan een atoom. Nu beginnen we de eerste aanwijzingen te zien dat de eigenschappen gaan veranderen. Wanneer we zeer nauwkeurig de elektrische weerstand meten van elk van de miljarden goudblokjes die we inmiddels hebben, door minutieus de elektrische bedrading telkens op exact dezelfde wijze aan te brengen, dan zullen we zien dat de waarde die we meten een klein beetje

verschilt van blokje tot blokje. Dit verschijnsel wordt overigens pas meetbaar wanneer we het experiment uitvoeren bij een zeer lage temperatuur van enkele graden boven het absolute nulpunt. De methode is praktisch niet erg uitvoerbaar, maar er is een eenvoudiger methode om hetzelfde effect waar te nemen. Daartoe meten we de weerstand van slechts één enkel blokje terwijl we een zwak magneetveld aanleggen dat we geleidelijk in sterkte veranderen. We zien dan dat de weerstand van dit ene blokje als functie van het magneetveld grillige variaties vertoont. De spreiding in de gemeten waarden, ofwel de amplitude van de fluctuaties, is gelijk aan de verschillen die we zouden vinden tussen de metingen van elk van de individuele blokjes.

Dit verschijnsel staat bekend onder de naam universele geleidingsfluctuaties. Het wordt universeel genoemd omdat de spreiding in de waarde van de geleiding gegeven wordt door de universele grootte e^2/h , dat wil zeggen de lading van het elektron in het kwadraat, gedeeld door de constante van Planck. Het maakt dus niet uit of we meten aan goud of aan lood, de geleiding vertoont dezelfde variaties.

De universele geleidingsfluctuaties vormen een eerste aanwijzing dat we het domein van de kwantummechanica betreden. De elektrische geleiding van een metaal is het resultaat van de vrije beweeglijkheid van de elektronen door het metaal, want in een metaal zijn de elektronen niet gebonden aan enig individueel atoom. Het genoemde effect van geleidingsfluctuaties wordt veroorzaakt door de eigenschappen van deze elektronen. Het effect is nog subtiel, maar naarmate we verder afdalen tot kleinere afmetingen van de metalen, dringen verder door in dit domein van de kwantummechanica en worden de effecten dramatischer.

De kwantummechanica geeft een theoretische beschrijving van het gedrag van elementaire deeltjes, waaronder de elektronen. Deze theorie is vaak strijdig met onze intuïtie, een intuïtie die gevormd is door onze ervaringen uit het dagelijks leven, waarin we niet geconfronteerd worden met microscopische verschijnselen. We mogen ons er dus niet al te zeer over verbazen dat de microscopische wereld beheerst wordt door wetmatigheden die ons bijzonder vreemd voorkomen. In die microscopische wereld kan men een elektron opvatten als een deeltje, dat we op een bepaald moment op een bepaalde plaats kunnen aantreffen, maar eveneens kunnen we het beschrijven als een golf die zich uitstrekt over het gehele stuk metaal, en waarvan de plaats dus onbepaald is. Welk van deze beide gezichtspunten van toepassing is hangt af van de vraag

die we stellen, ofwel hangt af van welke eigenschap van het elektron gemeten wordt.

Dit komt ons zeer vreemd voor. Van een biljartbal kunnen we zeggen dat deze een duidelijk bepaalde plaats heeft op elk moment in de tijd. Daarnaast kennen we het verschijnsel van een druppel die in een vijver valt en die een golfpatroon veroorzaakt dat zich over de gehele vijver uitstrekt. Maar we kunnen ons geen voorstelling vormen van een object dat die twee eigenschappen in zich verenigt. Niettemin is de kwantummechanica in staat, in elk geval in mathematische vorm, een synthese van deze eigenschappen te vormen die niet alleen de juiste voorspellingen geeft voor onze experimentele waarnemingen, maar ook de grenzen aangeeft van wat we met onze waarnemingen kunnen bepalen. Het gedrag van een elektronen wordt binnen deze theorie beschreven door de wiskundige vergelijking, die naar de Oostenrijkse natuurkundige Schrödinger is vernoemd, en beschrijft in principe alles wat we over het systeem kunnen zeggen.

Hoewel de kwantummechanica in alle opzichten voldoet aan wat men van een succesvolle theorie mag verwachten, namelijk een betrouwbare voorspelling geven van de uitkomst van metingen aan systemen van elementaire deeltjes, is zij in veel opzichten niet werkelijk bevredigend. De bezwaren zijn voor een deel van filosofische aard, maar belangrijker is dat de grens tussen microscopische en macroscopische verschijnselen slecht gedefinieerd is. Met name het proces van het uitvoeren van een meting op het systeem is nog altijd niet bevredigend beschreven. Voorlopig is er geen theorie in beeld die kandidaat is ter vervanging van de kwantummechanica, en misschien komt die er ook nooit. Laten we dus onze weg naar kleinere afmetingen voortzetten om verder door te dringen in het domein van de kwantumverschijnselen en een beter beeld te krijgen van deze magische wereld van Schrödinger.

We waren inmiddels gebleven op het niveau van goudkubusjes van een micrometer. Wanneer we elk van deze kubusjes verder delen in duizend gelijke delen belanden we op het niveau van honderd nanometer. Dat is ongeveer de afmeting van de kleinste onderdelen op een snelle computerchip die men tegenwoordig op industriële schaal weet te fabriceren. De kwantummechanische verschijnselen, die ik verderop uitgebreider zal beschrijven, worden hier al belangrijker. Ze spelen echter nog vrijwel geen rol voor de werking van een microprocessor of computergeheugen, omdat de temperatuur waarbij ze zich manifesteren nog steeds veel lager is dan de gewone omgevingstemperatuur. We

naderen echter wel de afmeting waarbij de lading van een individueel elektron zichtbaar wordt.

In dit verband kunnen we elk van de kubusjes opvatten als minuscule vertegenwoordigers van de fameuze Leidse Fles. In 1746 ontdekten de Leidse wetenschappers Cuneus en Musschenbroek dat het mogelijk is elektriciteit te bewaren in een fles die aan binnen- en buitenzijde is bedekt met een metaallaagje. Later is natuurlijk gebleken dat de vorm, een fles, niet relevant is. Elektrische lading kan van elk willekeurig stuk metaal naar elk ander stuk metaal worden overgebracht door een spanningsverschil aan te leggen. De hoeveelheid lading die op een dergelijk stuk metaal wordt opgeslagen is evenredig met de grootte van het aangelegde spanningsverschil, en evenredig met een grootte die we de elektrische capaciteit noemen. De capaciteit wordt bepaald door de vorm en afmetingen van het metalen voorwerp. Een groot metalen voorwerp heeft een grote capaciteit, eenvoudig omdat de elektronen die het metaal binnenstromen tijdens het opladen voldoende ruimte hebben om ver van elkaar vandaan een plaats te vinden. Wanneer we een klein metalen voorwerp willen opladen, dan is de capaciteit kleiner, omdat de elektronen gedwongen worden dicht op elkaar te zitten en bij het opladen hebben we daarom veel energie nodig om de onderlinge afstoting tussen de elektronen te overwinnen.

Voor de goudblokjes van honderd nanometer die we zojuist gemaakt hebben is de energie die nodig is om één enkel elektron aan het blokje toe te voegen groter dan de thermische energie bij kamertemperatuur. Wanneer we dan een spanningsverschil aanleggen en dit geleidelijk opvoeren, neemt de lading niet evenredig met de spanning toe, zoals we gewend zijn van de Leidse Fles, maar stapsgewijze, elektron na elektron. Dit fenomeen staat bekend onder de naam Coulombblokkade, en biedt perspectieven voor diverse toepassingen. Een toepassing op bescheiden schaal, die al bijna gerealiseerd is, gebruikt de mogelijkheid van dit effect om elektronen vrijwel letterlijk te tellen om een zeer nauwkeurige stroomstandaard te bouwen. De eerste die dit fenomeen van Coulombblokkade heeft beschreven was C.J. Gorter⁵, en ik beschouw het als een bijzondere eer de leerstoel te bezetten die zijn naam draagt.

Afdalend van honderd nanometer naar tien nanometer veranderen diverse eigenschappen van het materiaal van karakter. De meest opvallende van deze is wel de kleur. Hoewel de blokjes inmiddels veel te klein zijn om gezien te kunnen worden, absorbeert onze grote verzameling fijne goudblokjes

gezamenlijk wél een deel van het licht, en bij kleiner wordende afmeting verandert de kleur van de karakteristieke goudkleurige gereflectie tot een diep robijnrood voor het doervallende licht. Deze rode kleur kunt U bewonderen in sommige antieke gebrandschilderde ramen. Voor het verkrijgen van het zogenaamde robijn glas mengde men kleine hoeveelheden goudpoeder bij de glassmelt, en onder de juiste condities vormen zich daarbij minuscule goudbolletjes. Hoewel dit recept al vele eeuwen oud is, is de verklaring voor de kleurverandering pas aan het begin van de twintigste eeuw gevonden.

Onze blokjes bestaan nu nog slechts uit vijftienduizend atomen. Op de laatste etappe van onze ontdekkingsreis naar het atoom blijft er vrijwel niets meer over van de bekende eigenschappen van goud. Elektrische en magnetische eigenschappen veranderen fundamenteel van karakter en worden nu volledig gedomineerd door de kwantummechanica. Ook de mechanische eigenschappen zoals de elasticiteit en zelfs het smeltpunt worden erdoor bepaald. We dalen hiermee definitief af in Schödinger's wereld, en ik wil U graag een indruk geven van het bijzondere karakter van deze wereld. Voordat ik hiermee begin, zal ik U eerst een kort beschrijving geven van de experimentele technieken die ons in staat stellen deze wereld te verkennen.

Uit het voorgaande zou de indruk kunnen ontstaan dat voor het bestuderen van de eigenschappen van de vaste stof op de kleinste schaal ook de meest gecompliceerde technieken nodig zijn. Dit is slechts ten dele waar. Het instrument dat een centrale plaats inneemt in dit experimentele onderzoek op atomaire en moleculaire schaal is de 'rastertunnelmicroscoop', die in mijn inleiding al ter sprake kwam. Ik zal dit instrument hierna aanduiden met de afkorting STM, afgeleid van de Engelstalige benaming Scanning Tunneling Microscope.

De STM werd in 1981 uitgevonden door Gerd Binnig en Heinrich Rohrer van het IBM Zürich Research Laboratorium in Zwitserland. De werking van het instrument berust op hetzelfde principe als de stok die een blinde gebruikt om zich een beeld te vormen van zijn omgeving. Zoals ik hiervoor al heb aangegeven, zijn atomen niet in de gebruikelijke zin zichtbaar te maken. Aangezien wij door de beperkingen die de natuurwetten ons opleggen blind zijn in het land der atomen, doen we als een blinde en gebruiken onze tastzin. Onze blindenstok zal bestaan uit een fijn metaaldraadje dat eindigt in een zeer scherpe punt. Nu is alles wat wij scherp noemen op atomaire schaal nog altijd stomp en wanneer wij deze punt in direct contact met het te bestuderen metaaloppervlak

zouden brengen, dan dringt zich de vergelijking op van een blinde die zich bedient van een honkbalknuppel in een porseleinwinkel. We zouden vele atomen gelijktijdig raken, en door het contact dat we maken met onze metaalpunt zouden we zelfs de structuur van de atomaire rangschikking aan het oppervlak verstoren. We zullen dus veel delicateser te werk moeten gaan.

De STM gebruikt daartoe de principes van de kwantummechanica. De afmetingen van een atoom zijn niet scherp bepaald, aangezien de elektronen een wolk vormen rond de kern van het atoom die over een zekere afstand steeds dunner wordt. Wanneer we nu in staat zijn om de metaalpunt zeer voorzichtig naar voren te bewegen, zonder werkelijk contact te maken met het oppervlak, dan zullen we op een gegeven moment zien dat er onder invloed van een elektrisch spanningsverschil tussen de metaalpunt en het metaaloppervlak, een minieme stroom begint te lopen. Deze stroom kan al vloeien ruim vóórdat er werkelijk sprake is van mechanisch contact tussen punt en oppervlak dankzij de diffuse wolk die de elektronen vormen rond de atomen.

Men kan zich indenken dat we een aantal obstakels tegenkomen bij het realiseren van dit instrument. Ten eerste hebben we een geschikt mechanisme nodig waarmee we de verplaatsingen kunnen besturen op een dergelijk kleine schaal. Hiertoe maken we gebruik van een piëzo-elektrisch materiaal. Er zijn veel materialen die piëzo-elektrische eigenschappen hebben, het bekendste hieronder is kwarts, en we komen dergelijke materialen in het dagelijks leven tegen in gasaanstekers. Daar wordt gebruik gemaakt van hun bijzondere eigenschap dat er een elektrische spanning ontstaat wanneer we op het materiaal drukken, en die spanning is groot genoeg om een vonk op te wekken. De druk op het materiaal maakt het materiaal een klein beetje korter, en die lengteverandering is evenredig met de spanning. We gebruiken dit effect nu in omgekeerde zin: we nemen het piëzo-elektrisch materiaal en zetten er een elektrische spanning op, waardoor het van lengte verandert. Die lengteverandering is klein, gewoonlijk slechts een honderdste procent bij een spanning van duizend volt, maar dat is precies wat we nodig hebben. We kunnen in principe willekeurig kleine verplaatsingen maken door willekeurig kleine spanningen over de piëzo-elektrische actuator aan te leggen.

Verder is het voor de werking van het instrument belangrijk dat we maatregelen nemen tegen ongewenste trillingen uit de omgeving. Door het mechanisme zeer compact te maken, door toepassing van trillingsdempers en door een stabiele

ondergrond te kiezen is het mogelijk een trillingsniveau van slechts een tiende picometer te realiseren.

Men kan zich een voorstelling vormen van de lengteschalen die hier een rol spelen door de metaalpunt in gedachte uit te vergroten. Neem een metaalpunt die is gevormd aan het uiteinde van een draadje van een tiende millimeter, en nu vergroten we in gedachten deze punt uit tot de afmeting van de hoogste berg in Europa, de Mont Blanc. Staande op de top van de Mont Blanc zien we de dorpjes in de diepte en auto's als kleurige stipjes over de wegen glijden; de wind suist om je oren. Op deze enorme schaal van uitvergroting hebben atomen de afmeting van appels. De nauwkeurigheid waarmee we de afstand tussen de metaalpunt en het oppervlak stabiel kunnen houden komt dan overeen met de dikte van de schil van de appel.

De STM stelt ons zo in staat om de atomen aan het oppervlak van een metaal af te tasten, met een aanraking waarvoor het woord vederlicht nog te grof is. Door de metaalpunt over het oppervlak heen en weer te bewegen tasten we het hoogteprofiel af, en dit kan met behulp van een computer in fraaie plaatjes vertaald worden, waarop we de atomen zien liggen als appels in een kist keringschikt. Oneffenheden aan het metaaloppervlak hebben een gelijkenis met trap treden aangezien een hoogteverschil ontstaat door telkens een nieuwe atoomlaag op de vorige te stapelen. We komen gaten in het oppervlak tegen, waar één of meer atomen ontbreken, en we vinden individuele atomen of groepjes van atomen los op het oppervlak.

Maar er is meer. Wanneer we het oppervlak van goud bekijken voor een richting van de dichtste stapeling van atomen,⁶ dan zijn de hoogteverschillen die we waarnemen voor een perfect gladde stapeling van atomen zeer gering. We zien de hobbeltjes overeenkomend met de individuele atomen nauwelijks in onze meting terug. Het feit dat die hoogteverschillen in de waarnemingen zo gering zijn is het gevolg van de vrije beweeglijkheid van de elektronen in een metaal als goud. De wolken van elektronen rond elk van de afzonderlijke atomen vloeien voor een dichte stapeling van goudatomen vrijwel perfect samen tot een gladde vijver. Maar net als in een vijver kunnen we golven waarnemen in deze elektronen verdeling. Wanneer we een enkel solitair goudatoom plaatsen ergens midden op een dergelijk glad goudoppervlak dan zien we in onze STM plaatjes een patroon van cirkelvormige golven rond dat atoom alsof er op die plek een steen in de vijver is geworpen. Op deze wijze wordt het merkwaardige

golfkarakter van de elektronen, dat beschreven wordt door de kwantummechanica, op spectaculaire wijze direct waarneembaar.

De STM heeft anderen geïnspireerd tot het ontwikkelen van vergelijkbare instrumenten waarmee diverse eigenschappen op atomaire schaal gemeten kunnen worden. Van de vele variaties en uitbreidingen die inmiddels gerealiseerd zijn is de atomaire kracht microscoop een van de belangrijkste. Dit instrument is niet afhankelijk van elektrische geleiding zoals de STM, en kan atomen waarnemen door de kracht te meten die een atoom uitoefent op het voorste atoom van de punt waarmee we een oppervlak aftasten. Dit wordt veel gebruikt voor het in beeld brengen van atomen aan het oppervlak van niet-geleidende materialen, maar het is ook mogelijk om de kracht te meten die nodig is om een enkele atoombinding te verbreken. Zo kan men, om op ons voorbeeld van goud terug te komen, een goudpunt met een enkel atoom op een goudoppervlak in verbinding brengen, en vervolgens de kracht meten die nodig is om deze verbinding weer te verbreken. Die kracht blijkt ongeveer een nanonewton te bedragen, ofwel een tienmiljoenste van de zwaartekracht van één gram.

Voor wie nu de plaatjes bekijkt die de STM oplevert, en de atomen als bolletjes ziet liggen, en nog twijfelt aan de realiteit van deze objecten, kunnen we nog een stap verder gaan. Door de punt van de STM iets dichterbij het oppervlak te brengen ontstaat er, door de overdekking van de elektronenwolk van de punt met die van het atoom aan het oppervlak een zwakke metallische binding tussen de twee atomen. We kunnen de sterkte van de binding instellen door het instellen van de afstand. Op deze wijze is het met enige handigheid mogelijk individuele atomen aan het oppervlak op te pakken en naar elke gewenste plaats elders op het oppervlak te verplaatsen⁷. We kunnen zo structuren bouwen op de allerkleinste schaal, atoom voor atoom. Het is zelfs mogelijk atomen van verschillende soort met elkaar in contact te brengen om zo een enkele chemische verbinding gecontroleerd tot stand te brengen. Ook kunnen we een groter, organisch molecuul op het oppervlak in beeld te brengen, en het molecuul op een gewenste plaats door midden te knippen door op die plaats een korte stroompuls te geven.

Hoewel veel van deze technieken nog slechts in de kinderschoenen staan bieden ze een duidelijk perspectief van de mogelijkheden. We zullen meer en meer in staat zijn de materie op atomaire schaal te ontwerpen en de eigenschappen van deze kleinst mogelijke structuren te meten. Instrumenten als de STM worden

tegenwoordig ook veelvuldig toegepast voor onderzoek in andere vakgebieden, zoals de chemie of de biologie. Zo kan men bijvoorbeeld de kracht meten die nodig is om een enkel eiwitmolecuul te ontvouwen. Dit illustreert de enorme invloed die de uitvinding van de STM heeft gehad in een breed spectrum van de wetenschap en het was daarom zeer verdiend dat Gerd Binnig en Heinrich Rohrer in 1986 de Nobel prijs ontvingen voor deze ontdekking.

Ook onze groep in Leiden heeft een eigen techniek ontwikkeld die gezien kan worden als een variatie op de STM. Deze zogenoemde Mechanisch Controleerbare Breekjunctie techniek is speciaal geschikt voor het bestuderen van de eigenschappen van metallische contacten bestaande uit slechts enkele atomen. Dergelijke experimenten geven een prachtige illustratie van het bijzondere karakter van de metaaleigenschappen op atomaire schaal. Als voorbeeld nemen we twee dunne, maar macroscopische, gouddraadjes die we licht met elkaar in contact brengen. We meten nu de elektrische weerstand van dit contact terwijl we het contact langzaam en geleidelijk verbreken door de draaduiteinden uiteen te trekken. Tijdens het verbreken van het contact wordt het metaal op microscopische schaal opgerekt tot een dunne draad. Zoals ik zojuist heb vermeld, verschillen de mechanische eigenschappen van metalen op zeer kleine schaal sterk van de gebruikelijke. De manier waarop het contact tussen de twee gouddraadjes wordt opgerekt vertoont enige gelijkenis met draden die men trekt uit gesmolten kaas. Tijdens dit oprekken wordt het verbindingsdraadje snel dunner, en dit zien we terug in ons experiment aan de elektrische weerstand, die daardoor toeneemt. In de laatste fase van dit proces zien we de weerstand niet geleidelijk, maar stapsgewijze toenemen. De weerstand blijft ten slotte even hangen op ongeveer dertien kilo-ohm voordat het contact geheel verbroken wordt. Uit dit eenvoudige experiment kunnen we twee belangrijke fundamentele waarnemingen noteren.

Ten eerste de stapsgewijze toename van de weerstand, die een direct gevolg is van de atomaire opbouw van het contact. In de laatste fase van het oprekken van de dunne verbindingsdraad verloopt het proces van de vervorming in discrete stappen, waarbij de atomen waaruit de verbinding is opgebouwd, onder invloed van de mechanische trekspanning gedwongen worden zich telkens in nieuwe configuraties te rangschikken. Een nieuwe configuratie houdt een kort moment stand omdat de verdere oprekking kan worden opgevangen door elastische verlenging van de binding tussen de atomen, in analogie met het oprekken van een veer, totdat de totale elastische energie te groot wordt. Op dat moment springen de atomen naar een volgende configuratie die ervoor zorgt de krachten

in de metaalverbinding worden gereduceerd. Dat betekent dat het verbindingsdraadje langer moet worden, en bij gelijkblijvend aantal atomen moet dan ook de doorsnede van de draad dunner worden. De elektrische weerstand van de draad wordt voornamelijk bepaald door de diameter van de verbinding, en zo kunnen we de atomaire structuur herkennen in onze meting van de weerstand.

Een tweede fundamentele waarneming is de waarde van de weerstand op het moment van het verbreken van het contact. Deze waarde bedraagt in goede benadering dertien kilo-ohm. Het feit dat het laatste niveau van de weerstand vóórdat het contact uiteindelijk breekt goed reproduceerbaar een zelfde waarde oplevert, suggereert dat we hier te maken hebben met de weerstand van een contact dat nog slechts uit een enkel atoom bestaat. De waarde van de weerstand komt overeen met de fundamentele grootte $h/2e^2$, de kwantumweerstand, een eenheid die ik al even genoemd heb in verband met de universele geleidingsfluctuaties. De overeenkomst van de weerstand met deze fundamentele constante suggereert onmiddellijk dat de kwantummechanica nodig is om deze waarde te verklaren. Het moge duidelijk zijn dat voor de onderbouwing van de interpretaties die ik hier geschetst heb het nodig is om meer geavanceerde en gevarieerde experimenten uit te voeren.

Het zou te ver voeren om deze meer geavanceerde metingen hier in detail te bespreken, en ik zal me beperken tot een enkel voorbeeld. De techniek staat ons in staat het oprekken van het contact op elk willekeurig moment te stoppen om de eigenschappen van de geleider op ons gemak te bestuderen. We stoppen dan wanneer het contact nog slechts uit een enkel atoom bestaat en meten dan intrinsieke ruis in de stroom. We moeten hierbij bedenken dat de stroom is opgebouwd uit een grote verzameling individuele elektronen die voorbij stromen. Wanneer we ons voorstellen dat deze elektronen één voor één oversteken van de ene geleider naar de andere, dan kan men de stroom voorstellen als een snelle opeenvolging van individuele pulsjes willekeurig verdeeld in de tijd: één pulsje voor elk elektron dat oversteekt. De pulsjes volgen elkaar te snel op in de tijd om individueel waargenomen te kunnen worden. De snelle opeenvolging van pulsjes zien we dan als snelle variaties in de stroomsterkte, als een ruis op de stroom. Deze ruis wordt aangeduid met de term hagelruis, die verwijst naar het geluid van hagel op het dak.

Een ander voorbeeld van hagelruis is applaus: applaus bestaat uit een grote verzameling accoustische pulsen die we niet individueel kunnen onderscheiden,

maar we horen alleen het geheel als een ruis. Het is witte ruis, hetgeen betekent dat de gemiddelde geluidssterkte voor alle geluidsfrequenties gelijk is. Zolang er geen boe-roepers in de zaal zijn is applaus daarom niet te onderscheiden van het geluid van hagel op het dak.

Voor de ruis in de stroom door het atoom betekent dit dat we moeten zoeken naar een wit ruissignaal in de stroom. Dit signaal kan inderdaad gemeten worden, en het blijkt nu dat in de amplitude van deze ruis informatie gevonden kan worden over de geleidingseigenschappen van het atoom. Wanneer we een contact van een enkel atoom van een monovalent metaal, zoals goud, bestuderen, met een weerstand gelijk aan de quantumweerstand, dan verdwijnt de hagelruis volledig, terwijl voor andere waarden van de weerstand de ruis wèl wordt waargenomen. Deze quantumonderdrukking van de ruis was theoretisch voorspeld en vormt een prachtige bevestiging van een quantummechanische beschrijving van de geleiding door het atoom in termen van elektronengolven.

Hoe deze eigenschap samenhangt met het soort atoom dat we bestuderen kunnen we zien wanneer we de geleiding van goud met die van lood vergelijken. Terwijl een macroscopische draad van lood een tien maal hogere weerstand heeft dan een die van een zelfde draad van goud, is de weerstand van een enkel loodatoom drie maal kleiner dan die van een goudatoom. Elke elektrongolf die binnen het atoom past vormt een eigen kanaal voor de geleiding. Voor monovalente metalen is er slechts een enkele golf mogelijk, en is er een enkel kanaal voor de geleiding. Een enkel geleidingskanaal heeft in het ideale geval een weerstand gelijk aan de kwantumweerstand. Elk volgend kanaal geeft een parallelle bijdrage voor de geleiding en het totaal geeft dus een lagere weerstand. Het aantal mogelijke golven dat bijdraagt aan de stroom wordt dan bepaald door de chemische valentie van het atoom. Met de hagelruisexperimenten kunnen we inderdaad aantonen dat er drie geleidingskanalen door een loodatoom beschikbaar zijn.

Hoezeer de eigenschappen van metalen op atomaire schaal verschillen van die in de ons bekende wereld blijkt verder uit bestudering van een draad van individuele atomen. Het blijkt mogelijk te zijn een dergelijke draad te vormen die een geleidende verbinding vormt tussen de twee aansluitpunten, waarin de atomen dan zitten gerangschikt als kralen in een ketting. Op dit moment is het alleen voor goud en platina mogelijk dergelijke atomaire ketens te vormen, en de lengte is nog beperkt tot ongeveer zeven of acht atomen. De

kwantumeigenschappen komen geweldig duidelijk tot uiting in de geleiding van dergelijke ketens.

De geleiding op macroscopische schaal wordt beschreven door een van de bekendste wetten van de elektriciteitsleer, de wet van Ohm. Deze zegt onder andere dat, wanneer een draad een bepaalde weerstand heeft, een twee maal zo lange draad een twee maal zo hoge weerstand zal hebben. Dit sluit aan bij onze intuïtie, en de wet voldoet in het dagelijks leven zeer goed. Voor de ketens van atomen, echter, zien we iets totaal anders: de weerstand blijft gelijk, ongeacht de lengte van de keten. Het enige dat voor het bepalen van de weerstand van belang is, is de valentie van de atomen.

Men is geneigd te verwachten dat dergelijke atomaire draden zeer kwetsbaar zullen zijn, en het is daarom des te opmerkelijker dat het mogelijk is enorm grote stromen door een atomaire keten te sturen. Een keten van individuele goudatomen blijkt een stroom tot 100 micro-ampère te overleven. Ter vergelijking: in een gloeilamp van 100 Watt zit een wolfram draadje van ongeveer een tiende millimeter diameter, en de stroom van ongeveer een halve ampère warmt het draadje op tot het letterlijk witheet wordt. Zouden we de stroom met een factor twee vergroten dan smelt het draadje. Gerekend per oppervlakte-eenheid van de doorsnede van de draad is de stroomsterkte die een atomaire keten verdraagt twintigmiljoen maal groter dan die door de gloeilamp. Ook hierin uit zich weer het bijzondere karakter van materialen in Schrödinger's wereld.

Dames en Heren, ik heb U beschreven hoe recente ontwikkelingen ons in staat stellen met fysische methoden experimenten uit te voeren op de schaal van atomen, en verder hoe we geleidelijk aan leren hoe we structuren atoom voor atoom kunnen ontwerpen, bouwen en testen. Dit biedt een geweldig perspectief voor fundamenteel onderzoek en we zijn nog maar net begonnen om deze nieuwe wereld te verkennen. Hoewel men misschien geneigd is mijn enthousiasme voor dit onderzoek te delen, wordt ook vaak de vraag gesteld naar het uiteindelijk maatschappelijk nut van deze tak van wetenschap.

Ik zou dan bijvoorbeeld kunnen wijzen op de mogelijkheden voor grootschalige opslag van gegevens. Wanneer we ons voorstellen dat we informatie kunnen opslaan door atomen individueel op hun plaats te zetten en dat elk individueel atoom aan het oppervlak één bit aan informatie zou kunnen weergeven, dan zou het oppervlak van een harde schijf van een PC voldoende ruimte bevatten om

alle tekst te bewaren uit de boeken van vierduizend bibliotheken ter grote van de Leidse Universiteitsbibliotheek. Aan toepassingen in die richting wordt inderdaad gewerkt.

Ik zou ook kunnen wijzen op de mogelijkheid tot het bouwen van kwantumcomputers. De uitzonderlijke eigenschappen van de geleiders op zeer kleine schaal ondergraven de gebruikelijke principes die toegepast worden voor het bouwen van een computer. Er wordt echter in veel laboratoria nagedacht over de mogelijkheden van een geheel nieuw type computer, die juist gebruik maakt van de kwantummechanische principes, en die daarmee in staat is bepaalde opgaven zeer efficiënt uit te voeren. Dergelijke ontwikkelingen zijn zeker van belang.

Ik wil echter pleiten voor het beschermen van dat onderzoek, waarvan het maatschappelijk nut niet onmiddellijk zichtbaar is. De druk op de wetenschap om te werken aan problemen die op korte termijn van nut zijn voor de maatschappij is overigens niet nieuw. Nogmaals citeer ik Ludwig Boltzmann uit een rede gedateerd 1890. Er is ook in die tijd al veel geld te verdienen in de toegepaste wetenschap, met name de chemie, waar bijvoorbeeld Alfred Nobel zijn fortuin vergaarde. Boltzmann verdedigt in zijn toespraak het belang van theoretisch onderzoek, en het onderwerp emotioneert hem merkbaar, want hij formuleert het als volgt⁸,

“Laat de veelgestelde vraag, naar het nut van abstracte wetenschap, verstommen en stel de tegenvraag: wat is het nut van het streven naar vooruitgang door het verwerven van praktische voordelen wanneer dit ten koste gaat van datgene wat het leven de moeite waard maakt, namelijk het streven naar het ideale?”

Het werk van Boltzmann vormt een monument in de natuurwetenschap en hij heeft vele onderzoekers in latere generaties, waaronder met name Einstein, in hoge mate geïnspireerd. Gelukkig bestaat er in onze maatschappij nog ruimte voor fundamenteel onderzoek. Aan een universiteit als de onze zou ik dit willen koesteren.

Gekomen aan het eind van mijn rede wil ik allen die mijn benoeming hebben mogelijk gemaakt, danken voor het in mij gestelde vertrouwen. Ik ben mijn collega's van het Leidse Instituut voor Onderzoek in de Natuurkunde dankbaar voor de stimulerende omgeving die zij weten te scheppen. De dynamische en enthousiaste sfeer en collegialiteit maken dat ik mij hier zeer goed thuis voel.

Zeer geleerde van Deursen, beste Lex. Bij jou heb ik als promovendus de liefde voor het experimentele werk geleerd. Jouw enthousiasme, vaardigheid en inzicht zijn voor mij een belangrijk voorbeeld geweest.

Hooggeleerde de Jongh, beste Jos. Ik ben jou zeer dankbaar voor de grote mate van vrijheid die je mij hebt gegeven, en de loyale manier waarop je me steeds gesteund hebt. Je hebt me enkele van je beste studenten en promovendi toevertrouwd, zonder wie het onderzoek niet had kunnen uitgroeien tot het huidige niveau.

Ik beschouw het als een voorrecht voordurend te kunnen leren van het inzicht en de kennis van collega's binnen en buiten Leiden. Van de vele wetenschappers die mij tot voorbeeld dienen wil ik met name noemen Peter Wyder, van het High Field Magnet Laboratory in Grenoble, waar ik bijna drie jaar heb mogen werken en Igor Yanson van het Instituut voor Lage Temperaturen Fysica in Charkov. De vele vriendschappelijke discussies met Michel Devoret, Daniel Esteve en Cristian Urbina van de Groupe Quantronique in Saclay, waar ik een half jaar te gast mocht zijn, zijn van grote waarde geweest, want ze hebben mij steeds weer laten zien waar de grenzen van mijn begrip liggen.

Dames en Heren Promovendi en Studenten. Voor begrip is discussie nodig. Ideeën en begrippen hebben zich gevormd door vele verkeerde paden te bewandelen, voordat de juiste is gevonden. Van U wordt gevraagd de kennis en begrippen van enkele eeuwen aan wetenschappelijke ontwikkeling tot U te nemen in slechts 5 jaar. Mijn rede vandaag is een weinig effectieve, traditionele vorm van wetenschappelijke communicatie. Wat ik ermee hoop te bereiken is interesse wekken en ik nodig U uit om mij te blijven ondervragen en bestoken met alternatieve gezichtspunten, over elk onderdeel waar ik niet onmiddellijk overtuigend ben. Accepteer geen andere autoriteit dan Uw eigen begrip U toestaat.

Tot slot een kort woord voor mijn ouders, die mij veel hebben meegegeven, maar vooral het besef dat jullie er altijd voor mij zijn, ook al konden jullie mij niet meer volgen. Mijn laatste woorden zijn voor Edith, die vele rollen speelt in mijn leven, en die het daarom ten volle verdient te delen in de eer die mij vandaag ten deel valt.

Ik heb gezegd.

-
- ¹ R.P. Feynman, R.B. Leighton and M. Sands (1963) *The Feynman lectures on physics*, vol. I, Addison-Wesley, Reading, Massachusetts, p.1-2.
- ² C. Cercignani (1998). *Ludwig Boltzmann, The man who trusted atoms*. Oxford University Press, Oxford.
- ³ L. Boltzmann (1905). *Populäre Schriften*. Barth, Leipzig, p. 339 (mijn vertaling).
- ⁴ A. Beck and P. Havas (Eds.) (1987) *The collected papers of Albert Einstein*. Vol. I, *The early years*, Princeton University Press. (mijn vertaling gebaseerd op die naar het engels van Beck).
- ⁵ C.J. Gorter (1951) *A possible explanation of the increase of the electrical resistance of thin metal films at low temperatures and small field strengths*. Commun. Kamerlingh Onnes Lab. **XXV**, **Suppl. 103c**. (*Physica* **17** (1951) 777).
- ⁶ Goud is een metaal met een *face centered cubic* kristalrooster, en het oppervlak met de dichtste stapeling is het vlak loodrecht op de [111] as.
- ⁷ Een voorbeeld van het genoemde werk is te vinden in: M.F. Crommie, C.P. Lutz and D.M. Eigler, *Science* **262** (1993), 218.
- ⁸ Vrij naar L. Boltzmann (1905). *Populäre Schriften*. Barth, Leipzig, p. 79.