

# Dans der elektronen

**Als natuurkundigen maken we graag onderscheid tussen 'groot' en 'klein'. Grote dingen gedragen zich klassiek en kleine dingen quantummechanisch. Maar af en toe kunnen kleine zaken grote gevolgen hebben. Een voorbeeld hiervan is het Kondo effect.** Sander Otte

Het Kondo effect kan ontstaan wanneer individuele magnetische atomen zijn opgelost in een metaal waar ze door geleidings-elektronen worden afgeschermd. Is de magnetisatie van het atoom 'spin up' dan zijn de elektronen er omheen gezamenlijk 'spin down' en andersom. Maar het wordt pas interessant wanneer het metaal wordt afgekoeld tot onder de Kondo temperatuur. Dan komt de atomaire spin in een superpositie toestand - een combinatie van up én down - en als gevolg daarvan vormt de hele elektronenwolk er omheen een soortgelijke onbepaalde toestand: tegelijkertijd down en up.

Hoe groot die elektronenwolk precies is weet niemand, maar één ding is zeker: er doen veel elektronen aan mee. Het Kondo effect is dus een collectief effect, een zorgvuldig gechoreografeerde, quantummechanische dans van de elektronen rondom het magnetische atoom. Eén enkel atoom kan zo een grote invloed hebben op de collectieve elektronische eigenschappen van een metaal: een macroscopisch quantumstelsel.

Deze macroscopische eigenschappen kwamen voor het eerst aan het licht in

de jaren '30 van de vorige eeuw, in Leiden, tijdens geleidingsmetingen aan metalen bij lage temperatuur. Maar om de oorsprong van het effect goed te kunnen begrijpen moet je weten wat er gebeurt op de schaal van het centrale magnetische atoom. Toen het eind jaren '90 mogelijk werd om experimenteel individuele 'Kondo atomen' te bestuderen leidde dit dan ook tot een herleving van het onderzoekgebied [1].

Eén van de technieken die dit mogelijk maakte is de Scanning Tunneling Microscope (STM). Hierin tast een scherpe naald een oppervlak af zonder dit oppervlak zelf te verstoren. Door de naald vlak boven een magnetisch atoom te plaatsen dat op een metaaloppervlak ligt, konden voor het eerst op gecontroleerde wijze elektronen rechtstreeks in het hart van een Kondo systeem worden geïnjecteerd - een prachtig experiment! Maar de techniek had één nadeel: doordat het atoom direct bovenop een metaal lag was het Kondo effect bijzonder sterk. Zo sterk zelfs, dat door de intense koppeling met de geleidings-elektronen het individuele spinkarakter van het magnetisch atoom min of meer verloren gaat.

In een recent experiment [2] wordt daarom een 'verzwakt' Kondo systeem bestudeerd (zie figuur). Door een isolerende laag van één atoom dik aan te brengen tussen het metaaloppervlak en het magnetisch atoom, neemt de sterkte van de koppeling met de geleidings-elektronen aanzienlijk af. Als het atoom - in dit geval een kobalt atoom - nu door de STM naald wordt benaderd, kan een geleidingspectrum zoals in de figuur worden gemeten

door de spanning op de naald ten opzichte van het oppervlak te variëren.

De scherpe piek in de geleiding rond nul spanning is kenmerkend voor het Kondo effect: een bijzonder complexe, maar grotendeels begrepen resonantie die voortkomt uit het onbepaalde spinkarakter van de superpositie toestand. Maar wat dit spectrum zo speciaal maakt is de geleidingsstap rond 5 mV. Die stap markeert een excitatie van de spin op het atoom door interactie met de elektronen uit de naald. Bij lage spanning hebben de elektronen niet genoeg energie voor deze excitatie, maar vanaf een bepaalde waarde lukt het ze wél. Nu kunnen elektronen op twee manieren door het atoom stromen: mét excitatie of zonder. Dit opent een extra geleidingskanaal bovenop de gewone achtergrondstroom; vandaar de plotselinge toename in de geleiding.

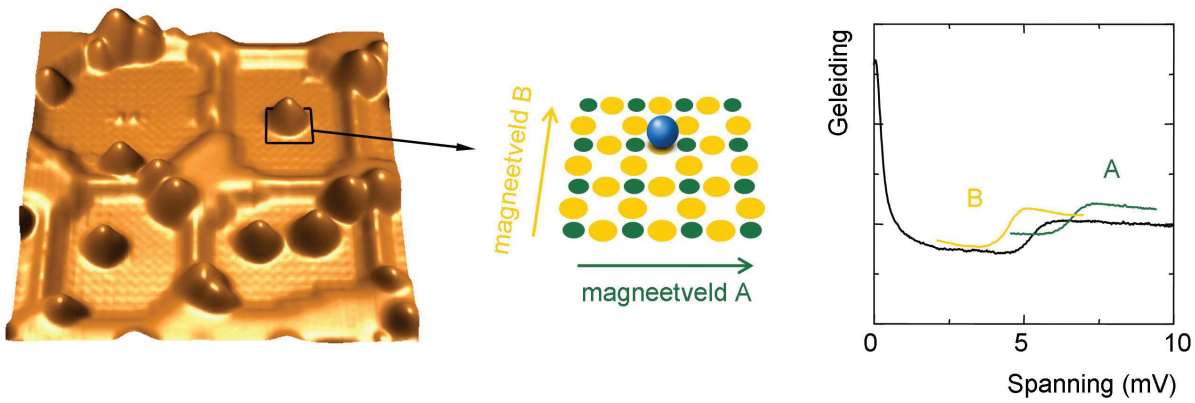
Van deze scherp gedefiniëerde excitatie valt veel te leren. Allereerst is het atoom nu kennelijk voldoende ontkoppeld om van één lokale spin te spreken; de isolatietruc heeft dus gewerkt. Daarnaast kunnen we concluderen dat deze spin een voorkeursoriëntatie heeft voor magnetisatie, anders viel er niks te exciteren. En bovendien weten we dat, wat die voorkeursoriëntatie ook is, het zo'n 5 meV kost (de energie die elektronen hebben bij een spanning van 5 mV) om de spin daar vandaan te draaien.

Maar dat is nog niet alles, want ook de oriëntatie zelf kunnen we vaststellen. Door sterke magneetvelden aan te leggen langs de verschillende kristalassen van het oppervlak, verandert - afhankelijk van de sterkte en richting van het magneetveld - de excitatie-energie, waardoor de stap verschuift.

Sander Otte is Post-doc aan het National Institute of Standards and Technology (NIST) in de Verenigde Staten. Hij promoveerde in Leiden en publiceerde verschillende artikelen over spin excitatie spectroscopie in samenwerking met het IBM Almaden Research Center.



aotte@nist.gov



Links: STM opname (10 nm × 10 nm) van individuele kobalt atomen op eilanden van isolerend kopernitride (één atoomlaag dik) bovenop een oppervlak van puur koper. Midden: Het kobalt atoom ligt zodanig op het kopernitride eiland dat het in de ene richting op een rij van koper (geel) én stikstof atomen (groen) ligt en in de andere richting alleen van koper atomen. Rechts: Metingen van de geleiding (eigenlijk differentiële geleiding) door het kobalt atoom. De gekleurde lijnen zijn gemeten bij magneetvelden van 7 Tesla langs de twee kristalassen van kopernitride.

In die verschuivingen zit een hoop informatie. Neemt de energie bijvoorbeeld toe (zoals bij magneetveld 'A' in de figuur) dan weten we dat het magneetveld de excitatie moeilijker maakt. Dit betekent dat het magneetveld op dat moment in dezelfde richting staat als de spin waardoor het nóg moeilijker wordt om deze weg te draaien. Neemt de energie echter af ('B' in de figuur) dan staat het magneetveld kennelijk loodrecht op de spin. In dat geval kan de spin, die graag naar het magneetveld toe wil draaien, juist makkelijker worden geëxciteerd. De waarneming van die ene stap biedt dus een unieke kans om een Kondo systeem tot in het fijnste detail te bestuderen. We weten nu langs welke

richting de centrale spin zich oriënteert en wat er voor nodig is om dit te veranderen. En hierin blijkt nu juist het geheim van het Kondo effect te zitten. Door het experiment te herhalen op verschillende magnetische atomen – sommige mét Kondo effect en sommige zonder – werd duidelijk dat de spinoriëntatie bepalend is voor de vraag of dit collectieve fenomeen kan plaatsvinden of niet. Alleen als de spin zodanig 'los' ligt dat één geleidingsatoom het kan omschoppen van up naar down is Kondo afscherming mogelijk. En zo wordt de mysterieuze dans der elektronen ineens een stuk inzichtelijker. Is daarmee het Kondo probleem voorgoed opgelost? Dat helaas nog

niet: er zijn nog altijd veel raadsels rondom het collectieve gedrag van de elektronen. Niet voor niets wordt het Kondo effect dan ook een 'veel deeltjes' probleem genoemd; een categorie problemen die berucht is om hun complexiteit. Maar de mogelijkheid om uit dit complexe systeem één specifiek deeltje – namelijk het atoom in het midden - te belichten en daarvan het magnetisme te doorgronden is een enorme stap in de goede richting.

#### Referenties

- 1 L. Kouwenhoven & L. Glazman, *Physics World* 14, 33 (2001)
- 2 A. F. Otte et al., *Nature Physics* 4, 847 (2008)

## Posterwedstrijd op Fysica 2009



Promovendi en andere fysici zonder een vaste aanstelling worden van harte uitgenodigd deel te nemen aan de Posterwedstrijd tijdens FYSICA 2009 op 24 april te Groningen. Voor de beste 3 posters is een mooie prijs beschikbaar: deelnemers maken kans op prijzen van € 500, € 300 en € 200 voor respectievelijk de

eerste, tweede en derde prijs. Een jury zal tijdens FYSICA de uiteindelijke winnaar bepalen en bekend maken, de prijzen zullen op FYSICA 2009 worden uitgereikt. The European Physical Journal (Springer Verlag) is sponsor van deze posterwedstrijd. De competitie staat open voor fysici van alle nationaliteiten.

Deelnemers kunnen zich aanmelden via [www.fysica.nl](http://www.fysica.nl), waar ook meer informatie te vinden is. Aanmelden kan tot en met 24 maart 2009.