

# Magnetische bewustwording

## Atoom voor atoom van spinqubit naar stabiele magneet

De magnetisatie van een spinqubit kan tegelijkertijd omhoog en omlaag zijn. Maar bij een macroscopische magneet ligt deze vast. Hoeveel spins heb je eigenlijk nodig om een stabiele klassieke magneet te maken? Door met een tunnelmicroscoop een magneet letterlijk atoom voor atoom op te bouwen, kunnen we deze ‘magnetische bewustwording’ uitstekend in kaart brengen. Daarbij is het mogelijk de collectieve dynamische excitaties (magnonen) van in het lab ontworpen nanomagneten te zien, en deze lokaal en op atomaire schaal aan te slaan. Sander Otte

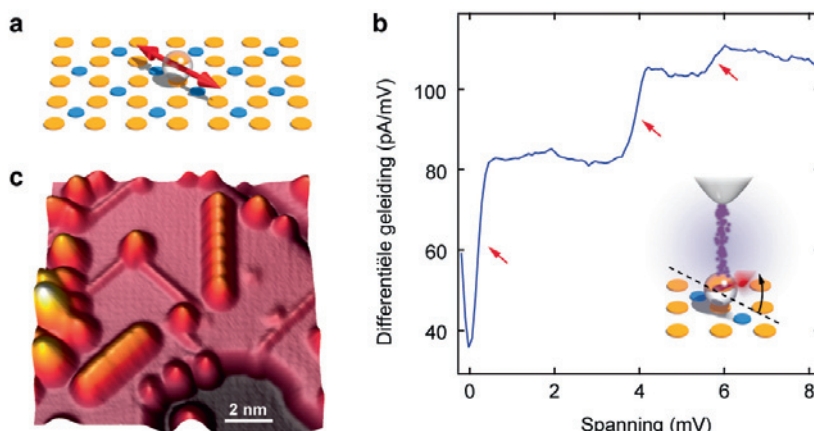
224

**M**agnetisme is een collectief fenomeen. Als heel veel magnetische atomen samen een materiaal vormen, dan kunnen die atomen besluiten om hun magnetisch moment allemaal dezelfde kant op te leggen (ferromagneet) of juist afwis-

selend omhoog en omlaag (antiferromagneet). Neem bijvoorbeeld een bit op een harde schijf: deze bestaat uit een aantal ferromagnetische korrels waarin die momenten allemaal dezelfde kant op staan gericht. Omvat de bit echter nog maar een

paar atomen, dan ontstaat een situatie waarbij de eigentoestanden niet meer eenvoudig omhoog en omlaag zijn, maar bijvoorbeeld 99% omhoog + 1% omlaag en 99% omlaag + 1% omhoog. Nu is er dus enige overlap tussen de twee magnetisatierichtingen. Schrijven we deze bit naar omhoog en laten we hem vervolgens aan zijn lot over, dan kan de magnetisatie op een willekeurig moment spontaan naar omlaag tunnelen. Naarmate het aantal atomen afneemt, wordt deze overlap alleen maar groter.

Bij hoeveel atomen begint dit proces? Die vraag is niet eenvoudig te beantwoorden. Ten eerste is het een geleidelijk proces. Ten tweede zijn er allerlei factoren die een rol spelen. Wat is de grootte van de spin op ieder atoom? Aan hoeveel burens is elk atoom gekoppeld en hoe sterk is die koppeling? Is er sprake van een kristalstructuur die een bepaalde voorkeursrichting oplegt? Hoe sterk is de koppeling tussen het spinmoment en het baanmoment van de elektronen? Al deze



**Figuur 1** a) Magnetische voorkeursas van een Fe-atoom op een rooster van Cu- (geel) en N- (blauw) atomen. b) Differentiële geleiding ( $dI/dV$ ) als functie van de spanning, gemeten op een enkel Fe-atoom. Spinexcitatie zijn aangegeven met rode pijlen. c) STM-topografie met daarop twee ketens van elk zeven atomen: één ferromagnetisch (linksonder) en één antiferromagnetisch (midden boven).

aspecten moeten in kaart worden gebracht voordat je kunt vaststellen hoe klein de minimale klassieke bit is, of hoe groot de maximale qubit.

### Bouwen met atomen

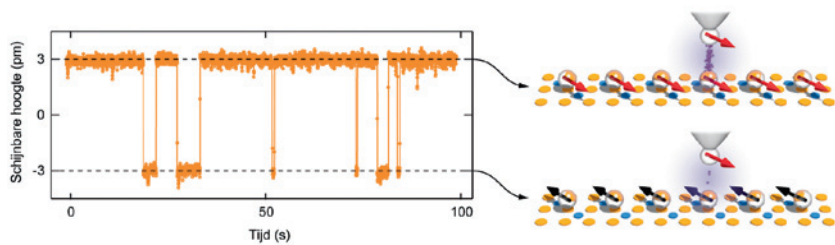
In ons lab in Delft bouwen we minuscule magneten door atomen één voor één te rangschikken met behulp van een tunnelmicroscop, of STM (*scanning tunneling microscope*), waarin een scherpe naald de atomen aftast. Dit gebeurt in een ultra-hoogvacuümomgeving bij een temperatuur van minder dan één kelvin. Liggen de atomen eenmaal op hun plaats, dan kunnen ze weken blijven liggen. Zo kunnen we in alle rust de geleidelijke overgang bestuderen van één enkele quantumspin naar een klein, maar stabiel stukje magneet.

De primaire bouwstenen in veel van ons werk zijn Fe-atomen die op een kopernitride ( $\text{Cu}_2\text{N}$ ) oppervlak zijn opgedampt. Op dit oppervlak zijn de atomen covalent gebonden. Hierdoor ervaren ze een sterke voorkeur om hun spins langs de as van hun bindingen met de naburige N-atomen te leggen (figuur 1a). Dit kan nog altijd twee kanten op en voor een enkel Fe-atoom is de polarisatie dan ook onbepaald: in dit geval tegelijkertijd naar links en naar rechts [1].

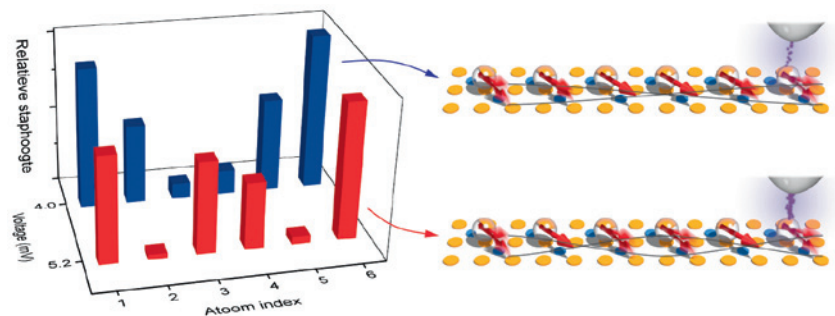
### Spinexcitatie

Andere oriëntaties van de spin zijn niet verboden, maar die kosten wat meer energie. Deze energie kunnen wij lokaal aan het atoom toedienen door middel van de tunnelstroom uit de STM-naald. Hiervoor moet er wel voldoende spanning worden aangelegd tussen de naald en het atoom. In figuur 1b staat een meting van de differentiële geleiding van het tunnelcontact als functie van deze spanning. Hierin verschijnt een aantal stappen waarvan elk correspondeert met een bepaalde discrete quantummechanische excitatie: een rotatie van de spin van de voorkeursas vandaan.

Met behulp van dit soort excitatiemetingen kunnen we veel leren over de magnetische omgeving van het atoom. Plaatsen we bijvoorbeeld een tweede atoom vlak bij het eerste, dan verschuiven de excitatie-energieën. Dankzij deze verschuivingen weten we dat de koppeling tussen de atomen, afhankelijk van hun exacte plaatsing, kan variëren tussen ferromagnetisch



**Figuur 2** Meting van de spingepolariseerde tunnelstroom (oftewel: de schijnbare hoogte van de atomen) op een keten van zes Fe-atomen als functie van de tijd, gemeten in een magnetisch veld van 100 mT. De magnetisatie van de keten klapt af en toe om van de parallelle toestand (+3 pm) naar de antiparallelle toestand (-3 pm) en vice versa. Rechts is een schematische weergave van de meting in beide toestanden te zien.



**Figuur 3** Hoogte van waargenomen stappen in de differentiële geleiding (zoals figuur 1b) voor twee opeenvolgende excitaties bij 4,0 mV en 5,2 mV op elk van de zes atomen in een ferromagnetisch gekoppelde Fe-keten. Rechts, impressies van de bijbehorende spingolftoestanden.

en antiferromagnetisch [2]. Deze eigenschap kunnen we gebruiken om spinketens te bouwen van beide soorten, zoals weergegeven in figuur 1c. Terug naar de hoofdvraag: vanaf welke lengte kiest zo'n keten voor één polarisatierichting en wordt hij klassiek magnetisch? Om dit te kunnen zien moeten we een meting doen die onderscheid maakt tussen de twee polarisaties uit figuur 1a. Dit kan met behulp van spin-gepolariseerde STM: een methode waarbij we het uiterste atoom aan het einde van de naald vervangen door een Fe-atoom (figuur 2). Plaatsen we deze gemagnetiseerde naald nu boven een Fe-atoom op het oppervlak, dan gedraagt het tunnelcontact zich als een magnetoweerstand: zijn de spins van de twee Fe-atomen parallel dan meten we een grotere stroom dan wanneer ze antiparallel zijn. Door dit ene atoom wordt de hele naald dus een soort minuscule versie van de leeskop in een harde schijf, waarmee we de magnetische oriëntatie van ieder atoom kunnen uitlezen.

### Omklappen

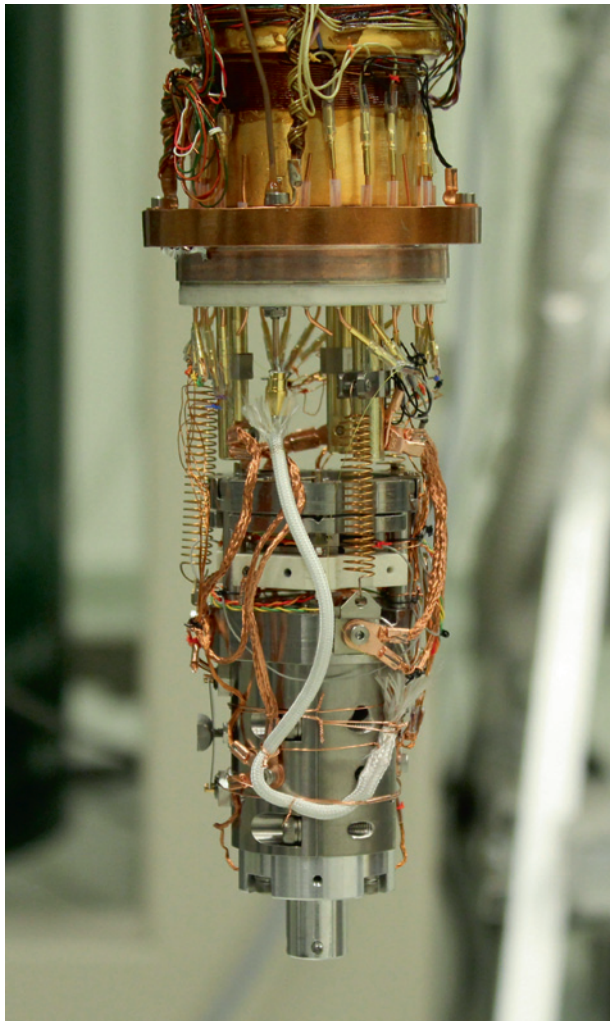
In een recent experiment hebben we met deze methode een aantal korte ferromagnetisch gekoppelde ketens onderzocht. Vanaf een lengte van circa vier atomen zien we dat de tunnelstroom niet langer constant is, maar plotselinge sprongen vertoont (figuur 2). Tijdens deze sprongen klapt de magnetisatie van de keten volledig om [3,4]. Voor vier atomen volgen de sprongen elkaar snel op, zodat het eigenlijk meer op een continue ruis lijkt. De tunnelkoppeling tussen de twee polarisaties is dan nog vrij sterk. Maar bij langere ketens worden de sprongen zeldzamer: bij zes atomen gaan er soms minuten voorbij zonder dat de magnetisatie verandert. Hoewel er veel tijd tussen twee omklappingen kan zitten, gaat het omklapproces zelf razendsnel: volgens onze berekeningen is het in een picoseconde gebeurd. De meetelektronica van de STM kan dit helaas bij lange na

te van circa vier atomen zien we dat de tunnelstroom niet langer constant is, maar plotselinge sprongen vertoont (figuur 2). Tijdens deze sprongen klapt de magnetisatie van de keten volledig om [3,4]. Voor vier atomen volgen de sprongen elkaar snel op, zodat het eigenlijk meer op een continue ruis lijkt. De tunnelkoppeling tussen de twee polarisaties is dan nog vrij sterk. Maar bij langere ketens worden de sprongen zeldzamer: bij zes atomen gaan er soms minuten voorbij zonder dat de magnetisatie verandert. Hoewel er veel tijd tussen twee omklappingen kan zitten, gaat het omklapproces zelf razendsnel: volgens onze berekeningen is het in een picoseconde gebeurd. De meetelektronica van de STM kan dit helaas bij lange na

Sander Otte promoveerde in Leiden in 2008 en werkte bij IBM Research en NIST, waar hij zich specialiseerde in lokale elektron-tunnelspectroscopie. Sinds 2010 heeft hij een eigen onderzoeksgroep in Delft, met als focus het ontwerpen en bouwen van kunstmatige atomaire spinroosters.



A.F.Otte@tudelft.nl



**Figuur 4** Foto van de STM-module (Unisoku USM1300). Tijdens experimenten hangt deze aan drie veren (voor trillingsisolatie) in een vacuüm van  $10^{-11}$  mbar. Bovenaan (goudkleurig) de pot met vloeibaar helium-3, dat de STM afkoelt tot 330 mK. Met behulp van een supergeleidende solenoïde kunnen magneetvelden tot 9 T worden aangelegd. De STM is circa 4 cm in diameter.

niet bijhouden. Het is dus onmogelijk om rechtstreeks te zien in welke volgorde de atomen hun spin omdraaien. Toch kunnen we, met behulp van wat *circumstantial evidence*, wel enig inzicht krijgen in wat er nu precies gebeurt in die ene picoseconde.

Dit doen we door het omklappen zelf actief aan te drijven. Door de naald op verschillende plekken boven de keten te plaatsen en de spanning op te voeren kunnen we lokaal spinexcitatie maken die de omklapfrequentie drastisch doen toenemen. Wat blijkt: deze toename hangt sterk af van de positie van de naald. Maken we een spinexcitatie aan een van de uiteinden van de keten dan heeft deze een veel grotere kans om tot een omklapping van alle spins te leiden dan wanneer we een excitatie met dezelfde energie aanslaan in het midden van de keten. Kennelijk hebben deze collectieve ex-

citaties dus een bepaalde niet-homogene structuur binnen de keten.

### Spingolven

Deze structuur kunnen we zichtbaar maken door spinexcitatie spectroscopie, zoals in figuur 1b, uit te voeren op ieder atoom in de keten. We zien hierbij dat de gemeten intensiteiten (dat wil zeggen de staphoogtes in de differentiële geleiding) van bepaalde excitaties variëren over de lengte van de keten. In figuur 3 is deze variatie weergegeven voor twee opeenvolgende excitaties, bij 4,0 mV en bij 5,2 mV. Hierbij springt onmiddellijk het golfkarakter van deze toestanden in het oog: de excitaties hebben knopen en buiken waarvan de posities worden bepaald door de randvoorwaarden. Het gaat hier dan ook om spingolven, ook wel magnonen genoemd, voor het eerst waargenomen met atomaire pre-

cisie [4]. Deze magnonen spelen een hoofdrol in het omklapproces: niet alleen in deze kunstmatige atoomketens, maar ook elke keer als je op je harde schijf een bit omschrijft!

Net als bijvoorbeeld fononen, kunnen magnonen uitstekend worden beschreven als quantummechanische quasideeltjes. Uitgaande van een spinmagnitude  $S=2$  per Fe-atoom, is de grondtoestand van de keten (222222), ofwel alle spins volledig dezelfde kant op gedraaid. Met de tunnelstroom slaan we één van de spins aan, laten we zeggen naar (22222↑). Maar in een magnontoestand raakt deze excitatie direct gedelokaliseerd. Het magnon bij 4,0 mV, bijvoorbeeld, kan geschreven worden als:

$$33\% (122222) + 16\% (212222) + 16\% (222212) + 33\% (222221).$$

Dus hoewel de stabiele grondtoestand van de keten vrijwel exact klassiek magnetisch is, zijn de dynamische aangeslagen toestanden nog altijd quantummechanisch van aard. Dit zal waarschijnlijk zo blijven zolang de keten korter is dan de vrije weglengte van de spingolf, oftewel, zolang de keten volledig defectvrij gebouwd is.

Samengevat bieden deze experimenten een unieke kijk in de prille beginfase van magnetisme. Dat is niet alleen fascinerend, maar ook technologisch waardevol. Goed begrip van welke effecten belangrijk zijn in magnetische stabilisatie kan ingenieurs helpen bij het ontwikkelen van nieuwe magnetische opslagmedia. Persoonlijk heb ik met dit onderzoek een fundamenteel doel voor ogen. Door grote atomaire spinroosters te bouwen en de koppelingen tussen de atomen nauwkeurig af te stemmen, moet het mogelijk zijn nieuwe complexe magnetische fasen te creëren die vooralsnog hoofdzakelijk op papier bestaan: spinvloeistoffen. Niemand weet hoe een materiaal zich in deze intrigerende hoedanigheid zal gedragen.

### Referenties

- 1 C. F. Hirjibehedin *et al.*, *Science* **317**, 1199 (2007).
- 2 B. Bryant *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **111**, 127203 (2013).
- 3 S. Loth *et al.*, *Science* **335**, 196 (2012).
- 4 A. Spinelli *et al.*, arXiv:1403.5890 (2014).