

De magneet die niet bestond

In 1966 voorspelde de Japanse natuurkundige Yosuke Nagaoka het bestaan van een nogal opvallend fenomeen: Nagaoka's ferromagnetisme. Zijn nauwgezette theorie verklaart hoe materialen magnetisch kunnen worden, met één voorbehoud: de specifieke condities die hij beschreef komen niet van nature in enig materiaal voor. Onderzoekers van [QuTech](#), een samenwerking tussen de TU Delft en TNO, hebben nu experimentele verschijnselen van Nagaoka's ferromagnetisme waargenomen met behulp van een ingenieus quantumstelsel. De resultaten zijn vorige week gepubliceerd in *Nature*.

Bron: persbericht QuTech



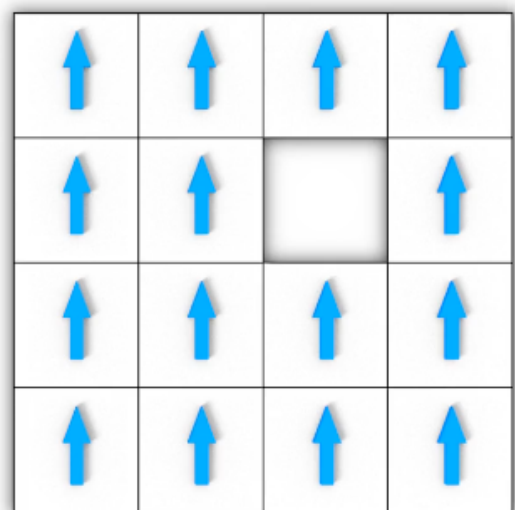
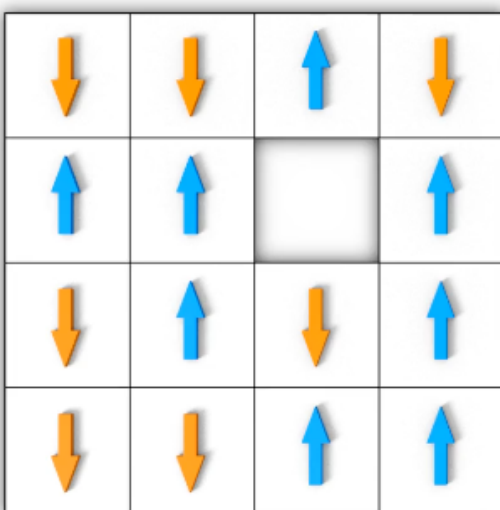
Afbeelding 1. Nagaoka-ferromagnetisme. Artistieke weergave van Nagaoka-ferromagnetisme op het 2x2-rooster

van quantumdots. Afbeelding: Sofía Navarrete and María Mondragón De la Sierra voor QuTech.

Magneten zoals die op je koelkast zijn een alledaags voorbeeld van een fenomeen dat **ferromagnetisme** heet. Magneten bestaan uit atomen, en atomen bestaan op hun beurt weer uit een kern en elektronen. Elektronen hebben een eigenschap die 'spin' wordt genoemd, wat er voor zorgt dat zij zich gedragen als minuscule magneten. In een ferromagneet richten de spins van vele elektronen zich parallel aan elkaar en combineren ze zich tot één groot magnetisch veld. Dit lijkt een eenvoudig concept, maar Nagaoka voorspelde een nieuw en verrassend mechanisme voor het optreden van ferromagnetisme, dat niet eerder in enig systeem was waargenomen.

Schuifpuzzel voor kinderen

“Een eenvoudige schuifpuzzel voor kinderen kan helpen om de voorspelling van Nagaoka te begrijpen,” vertelt JP Dehollain. Samen met Uditendu Mukhopadhyay voerde hij de experimenten uit. “Deze puzzel bestaat uit een rooster van vier bij vier tegels, met één enkele lege plek. Door de tegels te schuiven, kun je de puzzel oplossen. Denk vervolgens aan de Nagaoka-magneet als een soortgelijk tweedimensionaal, vierkant rooster, waarbij elke tegel een elektron is. De elektronen gedragen zich dan als de tegels in het kinderspel en schuiven rond in het rooster.”



Afbeelding 2. Een magneet als een schuifpuzzel. De schuifpuzzel kan gebruikt worden om Nagaoka ferromagnetisme uit te leggen. De puzzel links laat zien dat elke verschuiving de opstelling van de spins verandert. De puzzel rechts toont elektronen die zijn uitgelijnd. Dit verlaagt de energie van het systeem, net als bij Nagaoka's ferromagnetisme. Animatie van Scixel de Groot voor QuTech, [hier te bekijken](#).

Als de elektronen niet zijn uitgelijnd (dus als elke tegel een pijl heeft die in een andere richting wijst in de schuifpuzzel), dan zullen de elektronen na iedere verschuiving een andere opstelling vormen ten opzichte van elkaar. Als daarentegen alle elektronen zijn uitgelijnd (alle tegels hebben een pijl die in dezelfde richting wijst), dan blijft de opstelling altijd hetzelfde, ongeacht hoe de elektronen worden geschoven." Nagaoka ontdekte dat het uitlijnen van de elektronenspins resulteert in een lagere energie van het systeem," vervolgt Dehollain. "Als gevolg daarvan zal een systeem van een vierkant, tweedimensionaal rooster met één ontbrekend elektron van nature de voorkeur geven aan een toestand waarin alle elektronenspins zijn uitgelijnd – een Nagaoka-ferromagnetische toestand."

Doe-het-zelfmagneet

De onderzoekers hebben, voor het eerst in de geschiedenis, experimentele verschijnselen van Nagaoka-ferromagnetisme waargenomen. Mukhopadhyay: "We hebben dit bereikt door een apparaat te ontwerpen dat enkele elektronen kan 'vangen'. Deze zogenaamde [quantumdots](#) worden al een tijdje gebruikt in wetenschappelijke experimenten. Onze uitdaging was om een tweedimensionaal, zeer controleerbaar rooster van vier quantumdots te maken. Om deze apparaten te laten werken, moesten we een elektrisch circuit in de nanometerschaal bouwen, ze afkoelen tot bijna het absolute nulpunt (-273°C) en minuscule elektrische signalen meten."

"Onze volgende stap was om drie elektronen te vangen en deze vrij te laten bewegen binnen het twee-bij-twee rooster, waardoor de specifieke voorwaarden voor Nagaoka-ferromagnetisme werden gecreëerd," vervolgt Mukhopadhyay. "We moesten vervolgens aantonen dat dit rooster zich inderdaad als een magneet gedraagt. Het magnetisch veld dat door drie elektronen wordt opgewekt is te klein om met conventionele methoden te detecteren, dus in plaats daarvan gebruikten we een zeer gevoelige elektrische sensor die de

spinrichting van de elektronen kon 'ontcijferen' en omzetten in een elektrisch signaal dat we in het lab konden meten. Op deze manier konden we bepalen of de elektronenspins waren uitgelijnd zoals verwacht."

De puzzel opgelost

"De resultaten waren glashelder: we hebben Nagaoka-ferromagnetisme aangetoond," vertelt Lieven Vandersypen, hoofdonderzoeker en mededirecteur van het Kavli Institute of Nanoscience. "Toen we aan dit project begonnen, wist ik niet zeker of het experiment wel mogelijk zou zijn, omdat de fysica zo anders is dan al het andere wat we ooit in ons lab hebben bestudeerd. Maar ons team is erin geslaagd om de juiste experimentele omstandigheden te creëren voor Nagaoka-ferromagnetisme en toonde de robuustheid van het quantumdot-systeem aan."

Hoewel dit kleinschalige systeem nog lang geen implicaties heeft voor het dagelijks leven, is het een belangrijke mijlpaal op weg naar grootschaliger systemen zoals quantumcomputers en quantumsimulatoren. Vandersypen: "Zulke systemen maken het mogelijk om problemen te bestuderen die te complex zijn om op te lossen met de meest geavanceerde supercomputer van vandaag. Complexe chemische processen bijvoorbeeld. 'Proof-of-principle' experimenten, zoals het aantonen van Nagaoka-ferromagnetisme, bieden een belangrijke leidraad voor de ontwikkeling van quantumcomputers en -simulatoren van de toekomst."

Het wetenschappelijke artikel over dit onderzoek: [Nagaoka ferromagnetism observed in a quantum dot plaquette](#), Juan P. Dehollain, Uditendu Mukhopadhyay, Vincent P. Michal, Yao Wang, Bernhard Wunsch, Christian Reichl, Werner Wegscheider, Mark S. Rudner, Eugene Demler en Lieven M. K. Vandersypen, Nature 2020.