

Spintronica met roostertrillingen

Communicatie staat centraal in onze informatiemaatschappij, maar verbruikt veel energie. Toegepast maar ook fundamenteel onderzoek is dan ook gericht op het vinden van nieuwe natuurkundige processen en materialen om op een energiezuinige manier informatie te verwerken en te versturen. Hierbij zijn trillingen van de atomen in het materiaal vaak ongewenst vanwege hun bijdrage aan opwarming en dus energieverlies. Recent onderzoek laat verrassend genoeg zien dat deze trillingen ook aantrekkelijk kunnen zijn als dragers van informatie. Mede door deze ontwikkelingen staat Einsteins enige experiment weer volop in de belangstelling!



Bij elke e-mail of tweet die je verzendt wordt gebruikgemaakt van verschillende materialen en informatiedragers om te communiceren: voor lange afstanden tussen datacenters zijn er bijvoorbeeld glasvezels die lichtdeeltjes (fotonen) geleiden. Omdat het bericht je computer of smartphone verlaat, is de informatie opgebouwd uit elektrische stroompjes. Deze produceren veel afvalwarmte en verhogen dus het energieverbruik, wat ook de rekenkracht van je computer aanzienlijk beperkt. Spinelektronica, kortweg spintronica, wil daarom de elektrische lading als informatiedrager vervangen door de spin van het elektron – het intrinsieke impulsmoment oftewel het tollen van het elektron – dat de elektronen via hun elektrische lading ook een magnetisch moment of kompasnaaldje geeft. Recent is gebleken dat trillingen van de atomaire roosters in een vaste stof opgewekt door de elektronspin wellicht aantrekkelijker zijn dan elektronen als energiezuinige dragers van informatie.

Elk communicatiemedium heeft zijn eigen informatiedrager. Natuurkundig gezien is de informatiedrager vaak een golf. Denk bijvoorbeeld aan geluidsgolven in de lucht of de trillingen van het touw dat in het klassieke experiment de bodems van twee conservenblikjes verbindt waarin je spreekt en luistert. De informatiedrager en kwaliteit van het medium bepalen ook hoe ver de signalen komen. Hoe ver geluid draagt, hangt, met name bij heel hoge frequenties, bijvoorbeeld af van de mate waarin het wordt geabsorbeerd door de lucht en daarbij omgezet wordt in warmte.

Bij het overdragen van spininformatie door elektronen in elektrische geleiders wordt de maximale afstand waarover het signaal zich voort kan planten bepaald door botsingen met onzuiverheden. Bij dit soort botsingen kan de spin van het elektron, het ingebouwde kompasnaaldje dus, van richting veranderen. De mate waarin de spin verstoord wordt hangt dus van de zuiverheid van het materiaal af, maar ook van hoe sterk de beweging van het elektron gekoppeld is aan de richting van de spin. Bij een botsing verandert het elektron immers van richting, en als deze richtingsverandering sterk gekoppeld is aan de richtingsverandering van de spin zal de spininformatie snel

verloren gaan. Deze spin-baankoppeling is vooral sterk in zware metalen zoals platina, waarin de spinstromen maar een paar nanometer ver komen. In het veel lichtere koper hebben we te maken met honderden nanometers. Grafeen bestaat uit nog lichtere koolstofatomen op een honingraatrooster dat ook extreem zuiver gemaakt kan worden. De overdrachtslengte van spinstromen, oftewel de spindiffusielengte, is in grafeen dan ook in de orde van tientallen micrometers.

Alhoewel dit soort lengteschalen ruim voldoende zijn voor toepassingen in de nano-elektronica, hebben we nog steeds te maken met geleiders en dus met bewegende elektronen die door het botsen met onzuiverheden hun energie verliezen. Hierdoor lijkt het aantrekkelijk om isolatoren te gebruiken: materialen die geen elektriciteit geleiden. De elektronen blijven, ruwweg, aan de atomen zitten en kunnen dan ook niet botsen. Een belangrijke groep zijn elektrisch isolerende materialen die ook magnetisch zijn en spininformatie kunnen overdragen door middel van golfachtige bewegingen van de magnetisatie, spingolven dus. In een experiment dat in 2015 werd uitgevoerd door Ludo Cornelissen, destijds promovendus in de groep van Bart van Wees in Groningen, met yttriumijzergranaat (YIG), plantte spininformatie gedragen door spingolven zich voort over een afstand van tien micrometer bij kamertemperatuur [1]. Dit was een spectaculair resultaat omdat het eerste experiment in zijn soort zonder enige optimalisatie al de record spindiffusielengte van elektronen in grafeen haalde. Dit experiment gaf mede aanleiding tot de magnon-spintronica, het op dit moment zeer actieve deelgebied van de spintronica dat zich bezighoudt met overdracht van signalen door spingolven. Een magnon is de kleinste mogelijke quantummechanische trilling van de magnetisatie, vergelijkbaar met het foton en fonon voor licht en roostertrillingen. We gaan hier niet verder in op de magnon-spintronica maar stellen ons de vraag: is het mogelijk om met gewone isolatoren, materialen die geen elektriciteit geleiden en ook niet magnetisch zijn, toch spininformatie over te dragen? Voordat we deze vraag beantwoorden gaan we terug naar 1915 en een experiment dat mede werd uitgevoerd door 's werelds beroemdste theoretisch natuurkundige.

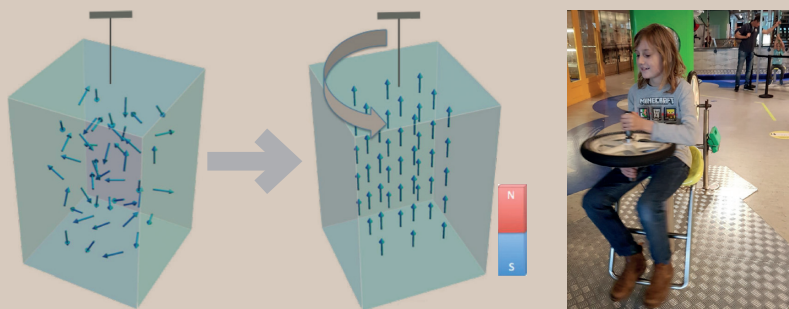


Rembert Duine (1975) is hoogleraar Theory of Nanoscale Systems in Utrecht en deeltijdhoogleraar aan de TU/e in de vakgroep Physics of Nanostructures. R.A.Duine@uu.nl

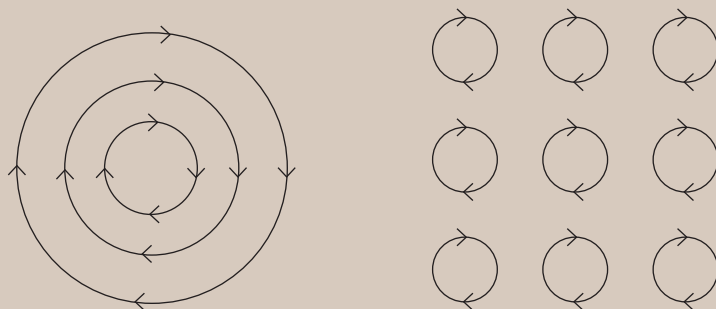


Gerrit Ernst-Wilhelm Bauer (1956) is hoogleraar theoretische natuurkunde in Delft en is in dienst van de Tohoku Universiteit in Sendai, Japan en bekleedt in deeltijd een hooglerschap aan de Rijksuniversiteit Groningen.

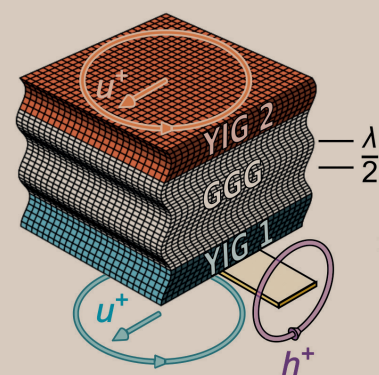
ONDERZOEK



Figuur 1: Het Einstein-de Haaseffect en behoud van impulsmoment. Links: de beginsituatie in het Einstein-de Haaseffect is een vrij hangende magneet waarin de nettomagnetisatie klein is doordat de bijdragen van de microscopische magnetische domeinen (pijltjes) elkaar opheffen. Onder invloed van een extern magneetveld gaan alle pijltjes in dezelfde richting staan (midden). Als gevolg van behoud van impulsmoment gaat de gehele magneet vervolgens om zijn as roteren (naar [6]). Rechts: de bekende demonstratie van het behoud van het impulsmoment. Foto: Geertje Spielman.



Figuur 2: Elke draaiing van een materiaal kan worden ontbonden in een draaiing van het gehele systeem (links) en een draaiing van de atomen rond hun evenwichtspositie (rechts). De tweede draagt niet bij aan de algehele draaiing. De rotatie van de atomen rond hun evenwichtspositie noemen we de fononspin. Vrij naar [7].



Figuur 3: Communicatie van spinimpulsmoment tussen twee magneten door roostertrillingen. De twee magnetische lagen bestaan uit YIG en zijn verbonden door de tussenliggende niet-magnetische GGG-laag. De magnetisatie dynamica in de twee YIG-lagen wordt aangegeven door de pijlen gelabeld met u^+ en wordt aangeslagen in de onderste laag door een extern magneetveld opgewekt door een wisselstroom in een onderliggende draad (h^+). De golflengte van de fonon resonantie is λ . Uit [4].

Van Einsteins enige experiment naar draaiende roostertrillingen

Het Einstein-de Haaseffect, genoemd naar het experiment dat voor het eerst werd uitgevoerd door Albert Einstein in samenwerking met de Nederlandse natuurkundige Wander Johannes de

Haas, is de door Lord Kelvin voorspelde relatie tussen magnetisme en impulsmoment of rotatie (figuur 1). In het experiment wordt de magnetisatie van een vrij hangende magneet gericht met een extern opgewekt magneetveld. Het vergroten van de magnetisatie in de richting van het externe magneet-

veld verandert ook het impulsmoment van de tollende elektronen die de magnetisatie veroorzaken. Het totale impulsmoment is behouden en omdat, in de eenvoudigste interpretatie van het experiment, het enige andere impulsmoment veroorzaakt kan worden door mechanische draaiing van het systeem, begint de magneet in zijn geheel te draaien. Dit experiment is een magnetische variant van de bekende demonstratie van behoud van impulsmoment (figuur 1): je zit op een bureaustoel en iemand geeft je een zwaar en snel draaiend vliegwiel waarvan de draaiingsas horizontaal is. Zodra je de draaiingsas een beetje verticaal draait, compenseert de bureaustoel dit door te gaan draaien met jezelf er bovenop. Ongeveer tegelijkertijd toonde Samuel Barnett het omgekeerde van het Einstein-de Haaseffect aan, namelijk dat rotatie een magnetisatie veroorzaakt.

De demonstratie van het behoud van impulsmoment illustreert ook op een subtiële manier een andere behoudswet, die van energie. Als je het vliegwiel van horizontaal naar verticaal draait kost dit spierkracht en krijg je het een klein beetje warmer. De energie van het draaiende vliegwiel plus de chemische energie opgeslagen in je spieren wordt dus omgezet in draaiingsenergie plus warmte. Hoe werkt dit precies in het Einstein-de Haaseffect? Hier hebben we te maken met magnetische en draaiingsenergie. Voor macroscopische systemen, dat wil zeggen systemen van 'alledaagse' grootte zoals gebruikt in het originele experiment van Einstein en De Haas, is de draaiingsenergie echter verwaarloosbaar ten opzichte van de magnetische energie. Maar om te kunnen voldoen aan de wet van behoud van energie moet de vrijgekomen magnetische energie toch echt ergens 'gedumpt' worden. De enige mogelijkheid is dat de roostertrillingen, oftewel hun quanta, de fononen, deze energie opnemen [2]! De roterende magneet wordt uiteindelijk dus ook een beetje opgewarmd. Nu we weten dat roostertrillingen een belangrijke rol spelen in het Einstein-de Haaseffect is de volgende vraag: wat gebeurt er met het impulsmoment van de elektronen, de spin, in dit proces? Kunnen de roos-

tertrillingen dit impulsmoment ook absorberen en wat betekent de spin van de roostertrillingen dan precies? Net zoals het impulsmoment van bijvoorbeeld de aarde de som is van de draaiing rond de zon (het baanimpulsmoment) en de draaiing rondom haar eigen as (het spinimpulsmoment, kortweg spin), draagt elke trilling van atomen rond hun evenwichtspositie bij aan rotatie van het materiaal als geheel, en rotatie van de atomen rondom hun evenwichtspositie (figuur 2). Deze laatste vorm van draaiing correspondeert nu met de spin van de roostertrillingen, afgekort tot fononspin. Een andere manier om de fononspin te begrijpen is als een superpositie van de twee loodrecht op elkaar staande transversale trillingen van de atomen tot een circulair gepolariseerd fonon. Hierbij ondergaan de trillende atomen cirkelbewegingen rondom hun evenwichtspositie en hebben zo op een natuurlijke manier spin. Dit is analoog aan circulair gepolariseerd licht dat ook spinimpulsmoment heeft. Dat fononen een spin kunnen hebben was al sinds de jaren zestig van de vorige eeuw bekend, maar ook weer grotendeels vergeten. De afgelopen paar jaar is de fononspin echter theoretisch herontdekt om relaxatie van de magnetisatie van magnetische isolatoren te begrijpen. Ook zijn er nieuwe experimenten die Einstein-de Haasachtige effecten bestuderen, zoals bijvoorbeeld in de context van de spindynamica van een magnetisch molecuul. Kan de fononspin ook rechtstreeks gemeten worden? Het antwoord hierop werd in 2018 gegeven in een experiment waarbij wederom gebruikgemaakt werd van de magnetische isolator YIG [3]. In dit materiaal is de koppeling tussen roostertrillingen en spingolven, de magneto-elastische koppeling, zo sterk dat het bij een bepaalde energie niet onderscheidbaar is of we met een spingolf of fonon te maken hebben. De ontstane golven worden magneto-elastische golven genoemd. Waar deze koppeling precies optreedt hangt af van de grootte van het magneetveld. Door ruimtelijke variatie van de sterkte van het magneetveld kan een excitatie, als die het gebied passeert waar de

koppeling tussen magnetisatie en roostertrillingen maximaal is, overgaan van pure spingolf naar magneto-elastische golf en eindigen als puur fonon. Een magnon, dus een quantum van een spingolf, heeft een impulsmoment gelijk aan de constante van Planck $\hbar$. In het experiment werd door middel van lichtverstrooiing gemeten dat het impulsmoment van de excitatie die na het doorlopen van het genoemde conversieproces een fonon is geworden, het impulsmoment van het magnon heeft overgenomen! Dit toont experimenteel het bestaan van de fononspin aan en maakt de vergelijking met circulair gepolariseerd licht – dat ook een spin heeft gelijk aan de constante van Planck – compleet. Volgende vraag is nu: kunnen we iets doen met deze fononspin? Kunnen we haar bijvoorbeeld verplaatsen in een materiaal en daarmee als drager van spininformatie gebruiken?

Spintransport door roostertrillingen

De eenvoudigste manier om het verplaatsen van fononspin te detecteren is door opnieuw gebruik te maken van de samenspraak tussen magnetisatie en roostertrillingen: de magneto-elastische koppeling. Dit kan in een sandwich waarbij een niet-magnetische isolator het 'beleg' is tussen twee 'boterhammen' gemaakt van een magnetische isolator (figuur 3). Als de magnetisatie in een van de twee magneten – zeg de onderste – aangeslagen wordt door bijvoorbeeld een tijdsafhankelijk magneetveld, dan wordt via de magneto-elastische koppeling ook het rooster in beweging gezet. De roostertrillingen kunnen zich vervolgens voortplanten van de magnetische isolator aan de onderkant, door de tussenliggende niet-magnetische isolator, naar de bovenste magnetische isolator, waar vervolgens magnonen worden gemaakt. Uit de manier waarop de fononen in het 'beleg' de 'boterhammen' verbinden, kan worden afgeleid dat spinimpulsmoment wordt uitgewisseld tussen de twee magneten. Eerder dit jaar werd deze koppeling experimenteel gerealiseerd door gebruik te maken van (alweer) YIG als mag-

netische isolator en paramagnetisch gadoliniumgalliumgranaat (GGG) als tussenliggend materiaal [4]. Hier bovenop hebben we theoretisch laten zien dat een opstelling als deze ook gebruikt kan worden om spintransport te realiseren tussen twee elektronische reservoirs [5]. Vanwege de extreem goede akoestische kwaliteit van GGG, wordt zowel in theorie als experiment een spinpropagatielengte gevonden in de orde van millimeters bij kamertemperatuur, wat de vorige recordlengtes, met name van elektronen in grafen en spingolven in YIG, doet verbleken!

Hoe verder?

Het transporteren van spins tussen twee elektronische reservoirs door middel van fononen moet nog experimenteel worden gerealiseerd. Ook lijken antiferromagneten, magnetische materialen waarin de magnetisch momenten van naburige atomen elkaar opheffen zodat ze van buiten niet-magnetisch lijken, een aantrekkelijk keuze van materialen om de fononspin in te zetten. Deze materialen zijn namelijk ongevoelig voor magneetvelden en zo robuuster voor toepassingen. Uiteindelijk is de opmars van het fonon in de spintronica, van ongewenst buitenbeentje dat energie verspilt naar drager van informatie, nog maar net begonnen en verwachten we veel nieuwe natuurkunde uit deze ontwikkelingen!

REFERENTIES

- 1 L.J. Cornelissen, Stroom sturen door een isolator: magnonen maken het mogelijk, *NTvN* **04**, 104-107 (2016).
- 2 Andreas Rückriegel, Simon Streib, Gerrit E. W. Bauer en Rembert Duine, Angular momentum conservation and phonon spin in magnetic insulators, *Phys. Rev. B* **101**, 104402 (2020); in dit artikel zijn ook alle historische referenties naar fononspin te vinden. Tevens bevat het artikel referenties naar moderne ontwikkelingen.
- 3 J. Holanda, D.S. Maior, A. Azevedo en S.M. Rezende, Detecting the phonon spin in magnon-phonon conversion experiments, *Nature Physics* **14**, 500 (2018).
- 4 K. An et al., Coherent long-range transfer of angular momentum between magnon Kittel modes by phonons, *Phys. Rev. B* **101**, 060407(R) (2020).
- 5 Andreas Rückriegel en Rembert A. Duine, Long-Range Phonon Spin Transport in Ferromagnet-Nonmagnetic Insulator Heterostructures, *Phys. Rev. Lett.* **124**, 117201 (2020).
- 6 M. Matsuori, J. Ieda en S. Maekawa, Mechanical generation of spin current, *Frontiers in Physics* 30 juli (2015).
- 7 D. A. Garanin en E. M. Chudnovsky, Angular momentum in spin-phonon processes, *Phys. Rev. B* **92**, 024421 (2015).