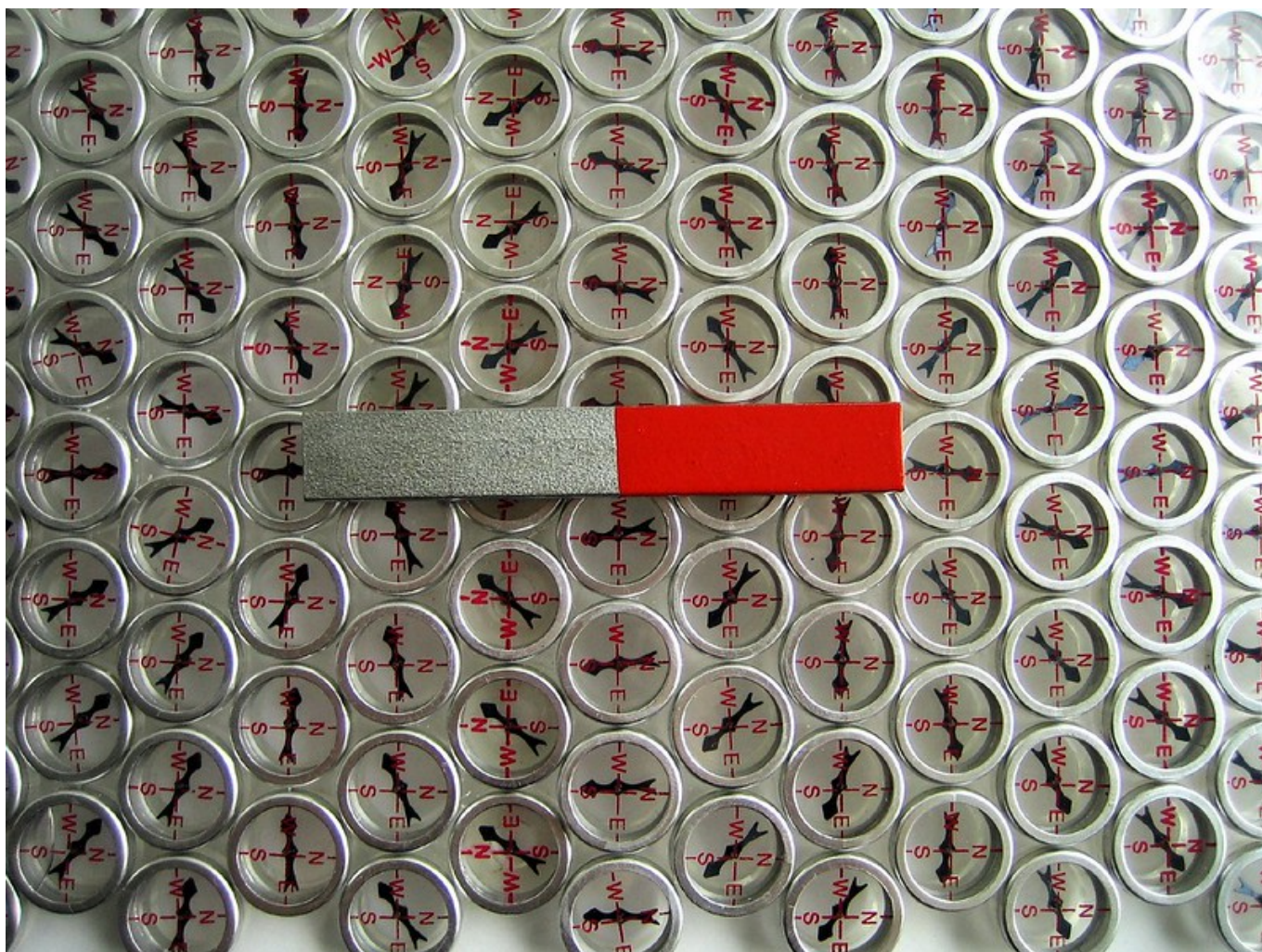


Altermagneten: een nieuw soort magnetisme

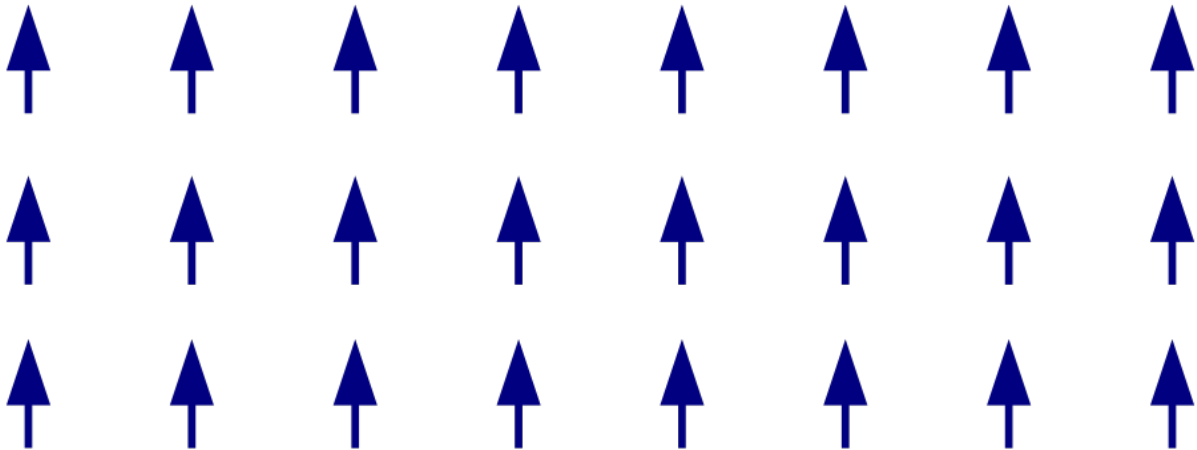
Er is in de wereld van magnetisme-onderzoek steeds meer aandacht voor een nieuw soort magnetisme: altermagnetisme. Altermagneten zijn materialen zonder een zogeheten magnetisch moment - zoals we er al heel veel kennen - maar met een aantal nieuwe eigenschappen doordat ze voorkomen in materialen met een geheel nieuwe symmetrie. Het bestaan van altermagneten is theoretisch voorspeld in 2019 en er is sinds vorig jaar ook steeds meer experimenteel bewijs dat deze verrassende materialen daadwerkelijk voorkomen. Naast fundamentele interesse zijn er ook verschillende ideeën over toepassingen, bijvoorbeeld in [spintronica](#).



Afbeelding 1. Een gewone magneet. Van een gewone magneet - een ferromagneet - begrijpen we goed hoe het magneetveld ontstaat. Er bestaan echter allerlei andere soorten magnetisme, waaronder het recent ontdekte altermagnetisme. Foto: [Dayna Mason](#) (CC-BY-NC-SA 2.0 Deed).

Om te begrijpen wat altermagnetisme is, moeten we eerst duiken in de vormen van magnetisme die al bekend waren. Wanneer je het hebt over magneten denken de meeste mensen aan koelkastmagneten of magnetische boekenleggers. Dit zijn zogeheten “ferromagneten”. De oorsprong van het magnetisme van deze en alle andere materialen zit in de *spins* van de elektronen in het materiaal. *Spin* is een quantummechanisch impulsmoment - een quantumversie van ronddraaien, dus - dat een klein magneetmoment met zich meebrengt waardoor elektronen zich gedragen als kleine magneetjes die samen een groter magneetveld kunnen veroorzaken. In een ferromagneet ordenen deze mini-magneetjes zich allemaal dezelfde kant op, wat een netto *magnetisch moment* en dus een magneetveld veroorzaakt. Wanneer de spins niet allemaal willekeurig alle kanten op wijzen

maar samen in één richting, noemen we dat “magnetische ordening”.

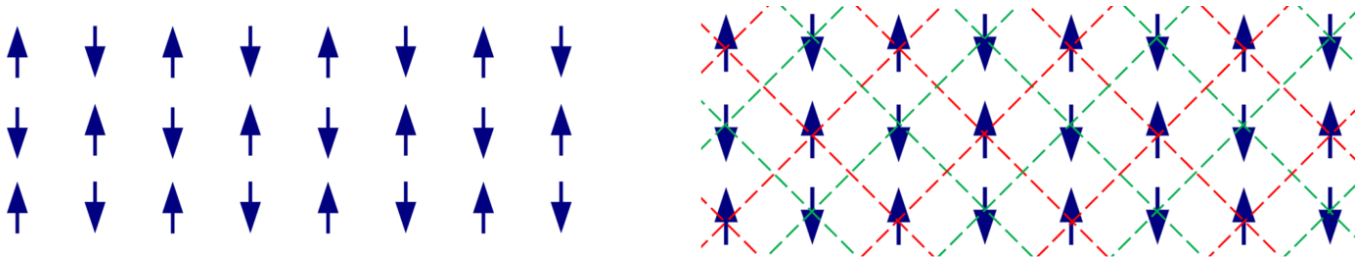


Afbeelding 2. De ordening van de spins in een ferromagneet. Alle spins wijzen dezelfde kant op. Afbeelding: [Michael Schmid](#).

Een andere vorm van magnetische ordening werd betrekkelijk recent, in de jaren dertig, ontdekt door Louis Néel. Hij ontdekte dat de spins ook om en om in tegenovergestelde richting konden staan. Hierdoor is er geen netto magnetisch moment, want de losse magneetvelden in tegengestelde richtingen heffen elkaar op. Er is echter wel degelijk magnetische ordening. Dit verschijnsel werd pas zo laat ontdekt doordat deze materialen geen eigen magneetveld produceren, waardoor je niet meteen aan een materiaal merkt dat het een antiferromagneet is.

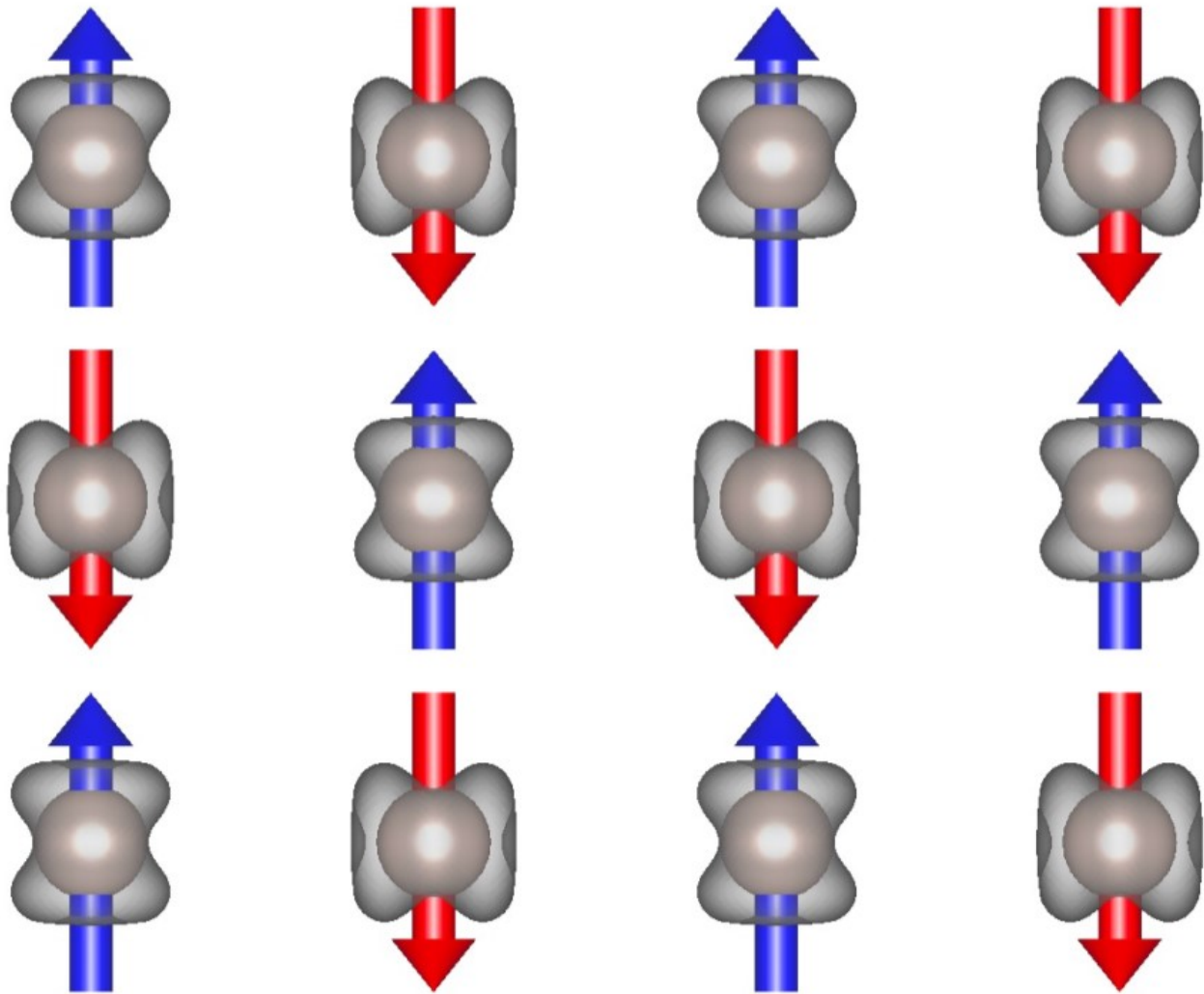
In een materiaal dat een vaste stof is, liggen alle atomen op een rooster met herhalende eenheden van steeds dezelfde patronen, zoals je al ziet in afbeelding 2 waar de spins niet willekeurig verdeeld, maar netjes op steeds gelijke afstanden van elkaar liggen. Bij een antiferromagneet kan je het rooster zien als één rooster met daarop tegenovergestelde spins, maar het is instructiever om het te zien als twee roosters die over elkaar heen gelegd zijn (met een verschuiving): één rooster met alle spins de ene kant op, en één met alle spins de andere kant op. Voor het gemak gaan we ervan uit dat de ene helft van de spins recht omhoog wijst en de andere helft recht omlaag; dit noemen we respectievelijk *up*- en *down*-spins. We zeggen dat deze verschoven roosters aan elkaar gerelateerd zijn via

“tijdsomkering” (of in het Engels: *time reversal*) omdat up-spins zich precies hetzelfde gedragen als down-spins zich zouden gedragen als je tijd achteruit af zou spelen.



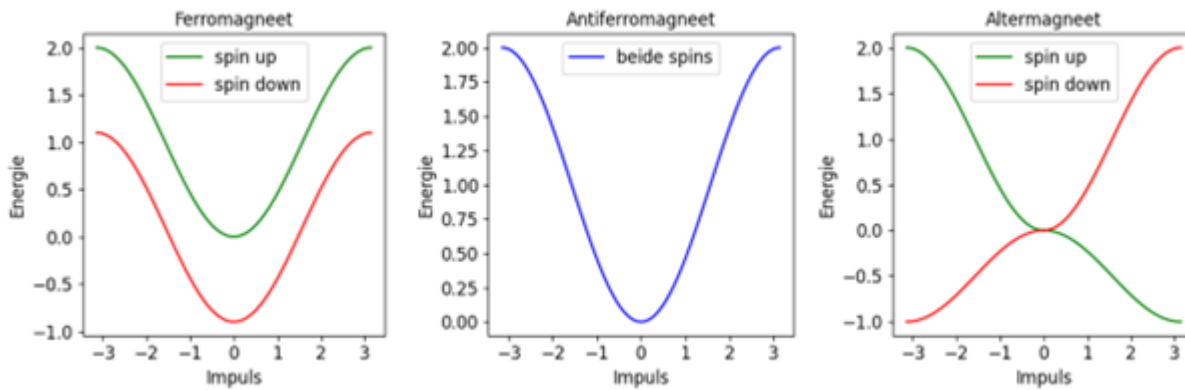
Afbeelding 3. Antiferromagnetisme. Links zien we een voorbeeld van een antiferromagneet met de helft van de spins omhoog en de helft omlaag. Alle spins liggen op een vierkant rooster. Rechts is dezelfde situatie weergegeven, maar het rooster is gesplitst in twee sub-roosters. De rode lijnen geven een rooster aan met alleen up-spins erop en de groene lijnen een rooster met alleen down-spins. Afbeelding: [Michael Schmid](#).

In 2019 voorspelde de Tsjechische natuurkundige Libor Šmejkal een materiaal dat net als antiferromagneten geen netto magnetisch moment heeft en wel magnetische ordening, maar waar de twee roosters aan elkaar gerelateerd zijn via een ándere symmetrie. Hij kwam op dit idee toen hij berekeningen aan het doen was aan het materiaal ruthenium(IV)oxide, RuO_2 , waarvan men destijds dacht dat het een antiferromagneet was. Šmejkal's berekeningen voorspelden dat het materiaal zich, ondanks het gebrek aan magnetisatie, net zo gedraagt als een ferromagneet wanneer er stroom doorheen gevoerd wordt. In een ferromagneet ontstaat een grote spanning (een potentiaalverschil) in de richting loodrecht op de richting van de stroom, door interactie tussen de elektronen en het interne magneetveld van het materiaal. Dit verschijnsel wordt het anomale Hall-effect genoemd. Bij het ontwikkelen van een theorie om dit effect te verklaren kwam Šmejkal uit bij de altermagneet.



Afbeelding 4. Altermagnetisme. Conceptuele weergave van een altermagneet. De spins op de twee sub-roosters zijn steeds 180 gedraaid ten opzichte van elkaar, net als in een antiferromagneet, maar daarnaast is de atomaire omgeving steeds 90 graden gedraaid. Afbeelding: [Libor Šmejkal](#).

Normaliter zijn de oriëntatie van de spins en die van de ordening van de atomen op het rooster aan elkaar gekoppeld, maar in altermagneten kunnen de twee onafhankelijk van elkaar draaien. Dit zorgt ervoor dat de sub-roosters niet aan elkaar gerelateerd zijn via translatie of tijdomkerings-symmetrie, maar via een rotatie. Het gevolg is dat de dispersierelatie van de elektronen (het verband tussen de energie van de deeltjes en hun impuls) er op het ene rooster anders uit kan zien dan dat op het andere rooster. Om dit duidelijker te illustreren, keren we eerst weer terug naar de ferromagneet en de antiferromagneet.



Afbeelding 5. Dispersierelaties van een ferromagneet, antiferromagneet en een altermagneet.

In de grondtoestand van een materiaal worden de elektronen verdeeld over de toestanden met de laagste energie.

In de ferromagneet heeft de dispersierelatie twee zogeheten banden: één voor de spins die allemaal de ene kant op staan, en één voor de spins die allemaal de andere kant op staan (zie afbeelding 5). De toestanden uit de lagere band zijn het meest gunstig voor de elektronen omdat deze de lagere energie hebben. Hierdoor nemen meer elektronen toestanden uit deze band aan – ze zijn in de [grondtoestand](#). Bij de energie/impuls-toestanden uit een band hoort ook een bepaalde spin – in het voorbeeld: spin down. Daarom is er netto magnetisatie als de ene band meer gevuld is dan de andere.

In de antiferromagneet hebben de spins op allebei de roosters allemaal dezelfde omgeving en dezelfde energie, en dus gedragen ze zich precies hetzelfde, behalve dat de spins de andere kant op wijzen. Dit zorgt ervoor dat de banden voor de spins die de ene kant op staan en die de andere kant op staan precies op elkaar liggen. Beide banden zullen precies evenveel gevuld zijn.

Bij de altermagneet ziet het plaatje er weer anders uit – zie de rechter figuur in afbeelding 5. Doordat de rotatie tussen de subroosters heeft plaatsgevonden, zien de banden van de verschillende roosters er niet meer precies hetzelfde uit. Ze liggen echter wel zo over elkaar dat het gunstig is om evenveel elektronen te hebben in de band voor de up-spinelektronen, als in die voor de down-spinelektronen. Juist het feit dat er verschillende banden zijn, zorgt in ferromagneten voor het anomale Hall-effect, en daardoor is het ook aanwezig in altermagneten.

Een gevolg van de bijzondere configuratie in altermagneten is dat, als je een altermagnetisch

materiaal samendrukt, de ene band sterker van energie kan veranderen dan de andere, omdat de sub-roosters verschillende geometrieën hebben. Dan kan het zomaar gebeuren dat het wél gunstig wordt om de ene band meer te vullen, wat zou zorgen voor een netto magnetisch moment. Dus dan heb je een materiaal gevonden of gemaakt dat alleen een magneet is onder hoge druk!

Een paar jaar lang was het bestaan van altermagneten alleen een interessante voorspelling. Recent is er echter door meerdere onderzoeksgroepen gemeten dat in mangaan(II)telluride – MnTe – de twee voorspelde banden inderdaad bestaan. Dit onderzoek werd gedaan met behulp van “angle resolved photo-emission spectroscopy” (ARPES). Bij deze techniek wordt er licht een materiaal in gestuurd met genoeg energie om een elektron vrij te maken. Van de elektronen die vrijkomen wordt de energie en impuls bepaald. Zo kan direct gemeten worden hoe de energie en impuls van de elektronen samenhangen, oftewel hoe de dispersierelatie van een materiaal eruitziet.

Door veel wetenschappers wordt het meten van de twee verschillende banden met ARPES gezien als bewijs dat MnTe inderdaad een altermagneet is, en dat Šmejkal's voorspellingen dus kloppen. Er wordt intussen hard gewerkt aan experimenten om meer eigenschappen van altermagneten aan het licht te brengen. Wordt ongetwijfeld vervolgd!