Het fracton: een fractie van een deeltje

Protonen, elektronen, fotonen – natuurkundigen geven de bouwstenen van ons heelal graag namen die op -onen eindigen. Het is dan ook niet verbazend dat fracties van deeltjes ‘fractonen’ worden genoemd. Maar wat is een fracton nu precies, en wat hebben we eraan? Nieuwe QU-redacteur Boris Post legt het uit.



Afbeelding 1. Fractonen. Zoals een taart uit fracties kan bestaan, zo kan een deeltje dat ook. Foto via Stocksnap.

In het dagelijks leven denken we bij ‘deeltjes’ meestal aan een soort bouwstenen van de materie om ons heen. We stellen ons quarks voor als legoblokjes, en protonen als projectielen die je op elkaar schiet in een deeltjesversneller. Maar voor quantumfysici zijn

deeltjes geen vastomlijnde brokjes materie: in plaats daarvan worden ze beschreven door excitaties van een *veld*, een beetje zoals de rimpelingen op een wateroppervlak. Het formalisme dat deze excitaties beschrijft heet *quantumveldentheorie* (zie bijvoorbeeld dit artikel op QU). Dit formalisme wordt toegepast op de meest uiteenlopende natuurkundige fenomenen, en is tot nu toe extreem succesvol geweest in het doen van nauwkeurige voorspellingen.

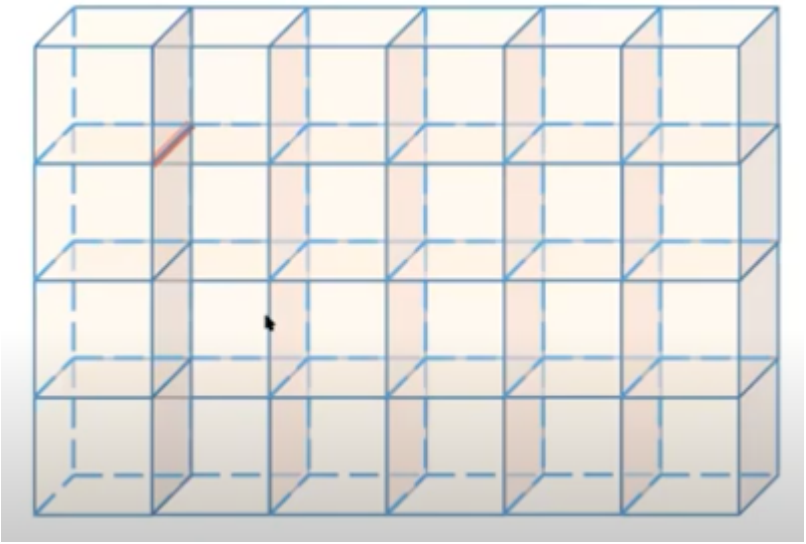
Het bekendste voorbeeld van quantumveldentheorie is natuurlijk het Standaardmodel van de elementaire deeltjes en krachten. Maar ook veel eigenschappen van materialen worden beschreven door een quantumveldentheorie. Dit laat zien dat quantumveldentheorie niet per se een fundamentele beschrijving van een systeem is, maar dat het ook een 'effectieve' beschrijving kan zijn die bijvoorbeeld alleen het gedrag van een systeem op grotere lengteschalen vat. Een simpel voorbeeld hiervan, al bestudeerd door Einstein, is het gedrag van geluidsgolven door een kristal: de deeltjes die met deze vibraties in het kristalrooster corresponderen heten *fononen*. Dit zijn dus geen fundamentele bouwblokken van de natuur, maar zogeheten *quasideeltjes*. Het raamwerk van quantumveldentheorie is een effectieve beschrijving van de wisselwerking tussen deze quasideeltjes[1].

Het bovenstaande verhaal is hoe men lange tijd nadacht over de rol van quantumvelden.

Maar de pilaren waarop quantumveldentheorie rustte werden in 2011[2] aan het wankelen gebracht door de ontdekking van een deeltje dat niet past in het gebruikelijke paradigma zoals hierboven omschreven. Dit deeltje heet het *fracton.* Ik schrijf 'ontdekking', maar daarmee bedoel ik een puur theoretische mogelijkheid van hun bestaan: fractonen zijn namelijk nog niet in het lab geproduceerd, hoewel in 2020 wel een recept werd gegeven voor een experiment[3]. En net zoals fononen zijn fractonen geen nieuwe fundamentele deeltjes, maar quasideeltjes. Wat maakt deze fractonen zo aansprekend voor theoretisch natuurkundigen?

De belangrijkste onderscheidende eigenschap van fractonen is dat deze deeltjes zich alleen door een materiaal kunnen voortbewegen door samen te werken met weer andere fractonen. Op zichzelf is een fracton immobiel, en ondervindt het een energiebarrière die zorgt dat het zich niet kan verplaatsen. Dit is anders dan een gewone lage-energie-excitatie, die zich met weinig moeite door een materiaal kan verspreiden. Maar wanneer er meerdere fractonen in

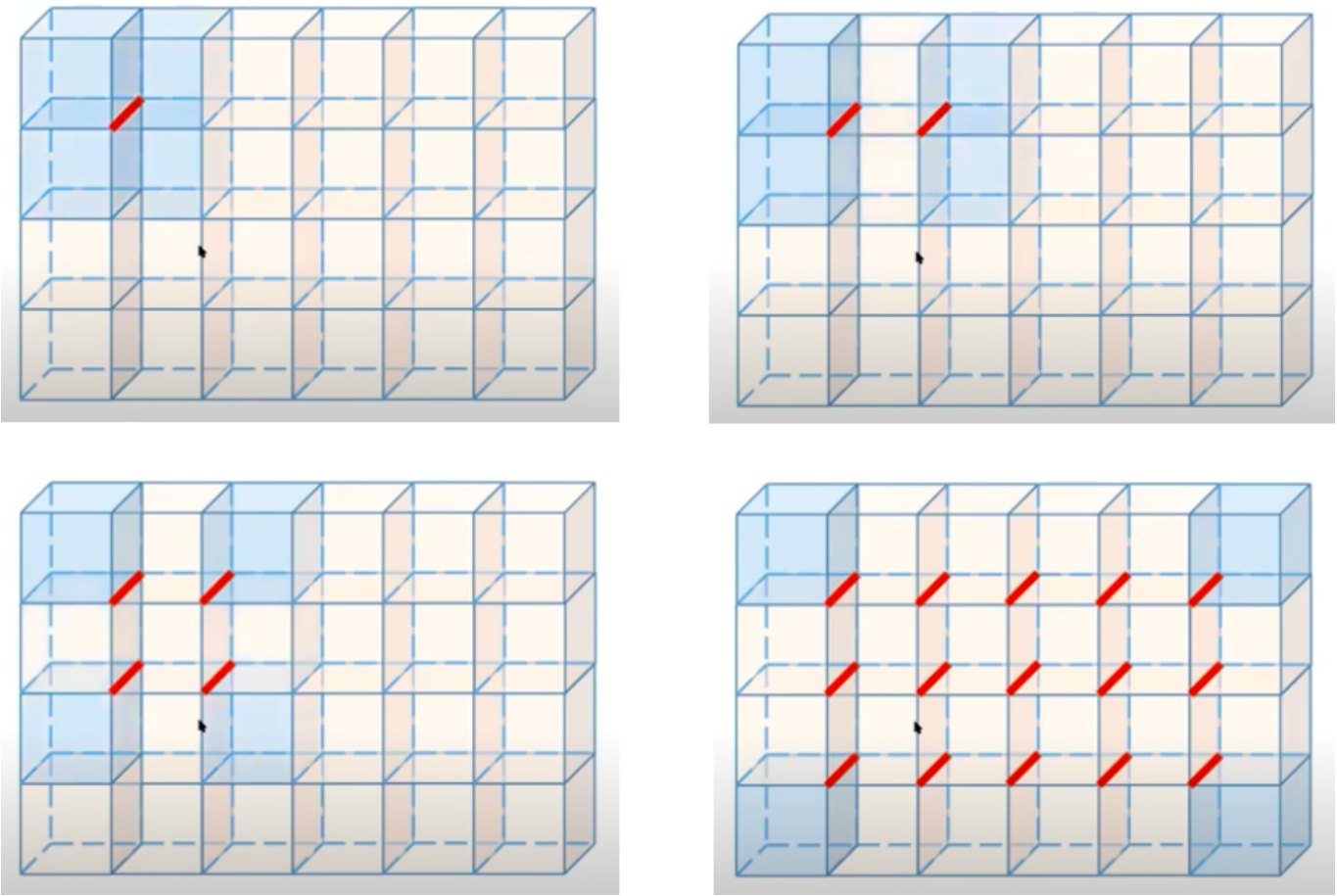
een materiaal worden aangeslagen, kunnen ze zich wel *samen* gelijktijdig voortbewegen. Daarom heten deze deeltjes ook fractonen: ieder fracton is een fractie van een deeltje, en alle fracties bij elkaar vertonen het gedrag van één enkel deeltje. Het vreemde is alleen: dit collectieve deeltje is opgebouwd uit fractonen die zich in totaal andere uithoeken van het materiaal kunnen bevinden!



Afbeelding 2. Het X-cube-model. Op alle ribben komen ‘deeltjes’ voor die een spin up of een spin down hebben.

Om meer intuïtie te krijgen voor hoe dit werkt, bekijken we het simpelste model met fracton-excitaties: het *X-cube-model*[4]. Dit model bestaat uit een kubisch rooster in drie dimensies, met op elke ribbe van het rooster een spin-variabele die de waarde +1 of -1 kan aannemen (met andere woorden: er bevindt zich een ‘deeltje’ dat ‘spin up’ of ‘spin down’ kan hebben). Een toestand van dit model wordt bepaald door van iedere spin te zeggen of deze up of down is. Elke toestand heeft een energie, die je kunt zien als het ‘prijskaartje’ van de toestand. Hoe duur elke toestand is wordt bepaald door een functie die de *Hamiltoniaan* heet. De Hamiltoniaan van het X-cube model is behoorlijk ingewikkeld en hangt af van de waardes van de twaalf spins op alle ribben van elke kubus. Om dit artikel te snappen hoef je echter maar twee eigenschappen van deze Hamiltoniaan te kennen: ten eerste, dat de ‘goedkoopste’ toestand, dus de toestand met de laagste energie, alle spins ‘up’ heeft. Een toestand waar dit voor bijna alle ribben geldt is weergegeven in afbeelding 2. En, ten tweede, dat de prijs van een kubus verhoogd wordt als deze grenst aan een *oneven* aantal zogeheten ‘spin-

operatoren’. Zo’n operator klapt simpelweg de spin op een gegeven ribbe om van ‘up’ naar ‘down’, of vice versa, en deze operator duiden we aan met een roodgekleurde ribbe als in afbeelding 3. Een kubus met een verhoogde prijs (met een ‘excitatie’ op een van de ribben) kleuren we vervolgens blauw. Maar een kubus die aan een *even* aantal spin-operatoren grenst behoudt dezelfde prijs, en blijft crèmekleurig. Met deze set regels kunnen we gaan spelen: begin bijvoorbeeld met één enkele spin-operator, zoals in afbeelding 3a, ergens in het rooster. De vier aangrenzende kubussen zijn allemaal van de hoge prijsklasse (blauw), dus het kost je eenmalig een zekere prijs om deze toestand te maken. Voeg nu een tweede spin-operator toe, zoals in afbeelding 3b: twee van de vier blauwe kubussen zijn weer terug naar crème, omdat ze nu aan twee rode ribben grenzen, terwijl twee kubussen die eerst crème waren nu blauw zijn geworden. Ga zo door tot en met afbeelding 3d, en overtuig jezelf ervan dat de enige kubussen die aan een oneven aantal rode ribben grenzen de vier hoekpunten zijn. Merk op dat de prijs van de uiteindelijke toestand dezelfde is als degene waarmee we begonnen waren, namelijk de prijs van vier blauwe kubussen. Overtuig jezelf er ten slotte van dat er geen *lokale* operatoren zijn waarmee je de vier hoekpunten kunt rondbewegen, zonder daarvoor een prijs te betalen (oftewel, zonder daarbij nieuwe blauwe kubussen te krijgen). Met een *lokale operator* bedoel ik in dit geval dat je alleen rode ribben toevoegt in de directe omgeving van het blauwe blokje dat je zou willen verplaatsen. Je zult merken dat je met zulke lokale operaties altijd extra blauwe kubussen creëert. Conclusie: de enige mogelijkheid om de hoekpunten in beweging te krijgen zonder extra energiekosten is door het hele ‘kleedje’ van rode lijnen in zijn geheel te laten groeien, waarbij er altijd minstens twee hoekpunten tegelijk bewegen!



Afbeelding 3. Fractonen. Linksboven (a) is één ribbe rood gekleurd, wat leidt tot vier blauwe blokjes. Rechtsboven (b) voegen we een rode ribbe toe, waarna er nog steeds vier blauwe blokjes zijn. Ook in de verticale richting kunnen we rode ribbes toevoegen (c) zonder dat het aantal blauwe blokjes verandert. Uiteindelijk (d) kunnen zo de blauwe blokjes door het hele materiaal bewegen.

De blauwe hoekpunten van dit simpele model zijn een voorbeeld van fractonen. We hebben nu gezien dat de hoekpunten alleen kunnen bewegen door ’samen te werken’ in paren of in groepjes. Bovendien zagen we dat de operatie die daarvoor nodig was niet-lokaal is: je moet heel veel verschillende spins, overal in het materiaal, tegelijk omklappen van up naar down om kosteloze beweging van de hoekpunten te bewerkstelligen. Dat betekent dat lokale verstoringen, bijvoorbeeld door temperatuurschommelingen in een materiaal, nooit de fractonen in beweging zullen kunnen brengen – tenminste, niet als de prijs van een excitatie hoog genoeg is. Zelfs als het rooster heel groot zou zijn, blijven de vier hoekpunten met elkaar vervlochten en ‘herinneren’ ze zich de posities van de andere drie.

Wat betekent dit voor quantumveldentheorie? Normaal gesproken werkt het zo dat het

gedrag van een quantumsysteem met een groot aantal deeltjes op grote lengteschalen ongevoelig is voor de precieze microscopische structuur van het systeem. De continue quantumveldentheorie ‘vergeet’ als het ware de precieze microscopische details, ten faveure van de relevante fysica op langere afstanden. In het eerder genoemde voorbeeld van fononen in een kristal (denk aan geluidsgolven die door een wijnglas bewegen) maakt de structuur van de individuele moleculen van het kristal niet zo veel uit, en zijn de relevante quasi-deeltjes de geluidsgolven zelf, die op een veel grotere lengteschaal opereren. Bij fractonen is dat anders: zelfs op grote lengteschalen maakt de individuele positie van de fractonen uit voor het gedrag van de quasi-deeltjes die uit meerdere fractonen zijn opgebouwd. Fractonen behouden dus informatie over de microscopische details van het materiaal, zelfs op grote afstanden. Natuurkundigen noemen dit *UV/IR mixing*: informatie over korte golflengtes (ultraviolet, dus hoge energie) wordt vermengd met die over lange golflengtes (infrarood, dus lage energie). Dit idee gaat echter in tegen het standaard paradigma van quantumveldentheorie, waarin juist een duidelijke scheiding van energieschalen is aangebracht. Ons begrip van quantumveldentheorie moet dus worden uitgebreid, en dat is precies waar een aantal theoretisch natuurkundigen nu aan werkt.

Behalve de meer theoretische vragen die fractonen oproepen, worden er ook belangrijke toepassingen van het idee voorzien. Een voorbeeld daarvan is het ontwerp van quantumcomputers. In dat vakgebied is het ontwerpen van een harde schijf waarop je qubits zou kunnen opslaan een grote technische uitdaging, omdat qubits makkelijk hun quantumeigenschappen verliezen door interacties met hun omgeving. Nu hebben we zojuist gezien dat fractonen zeer immobiel zijn, en ongevoelig voor lokale verstoringen in hun directe omgeving. Dit maakt ze robuuste kandidaten voor het ontwerpen van een harde schijf van een quantumcomputer – mits ze natuurlijk in de nabije toekomst in het lab kunnen worden gemaakt. Historisch is de toepassing in quantumcomputing ook de manier waarop fractonen zijn ontdekt: de zogeheten “Haah code” (voetnoot 2) was specifiek ontworpen om stabiele, immobiele qubits te maken. Haah’s code is complexer dan het simpele voorbeeld van hierboven: de fractonen leven op de hoekpunten van een fractaal (de 3D versie van een Sierpiński driehoek), zie afbeelding 4.



Afbeelding 4. Haah's code.
In dit model bevinden de fractonen zich op de hoekpunten van een fractal.

Ten slotte zijn er allerlei verbanden gevonden tussen fractonen en andere natuurkundige fenomenen. Het 'memory effect' van fractonen die zich de positie van de andere fractonen herinneren, lijkt sterk op eenzelfde eigenschap van glasachtige materialen. Verder zijn er links gevonden met de theorie van elasticiteit, en zelfs hints van zwaartekracht! Al met al zijn fractonen vandaag de dag een hot topic in de theoretische natuurkunde, en het laatste woord is er nog niet over gezegd.

---

[1] Sterker nog, de meeste theoretisch fysici geloven dat het Standaardmodel ook alleen maar een effectieve beschrijving is van een onderliggende, nog onbekende beschrijving die ook zwaartekracht verklaart. Zie bijvoorbeeld de serie artikelen over snaartheorie op QU.

[2] https://journals.aps.org/pra/abstract/10.1103/PhysRevA.83.042330

[3] https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.124.127203

[4] https://journals.aps.org/prb/abstract/10.1103/PhysRevB.94.235157