Kun je zitten op een stoel?

Iedereen weet natuurlijk dat een stoel gemaakt is om op te zitten. Waarschijnlijk zit je zelfs op een stoel terwijl je dit leest. Maar is het eigenlijk wel zo logisch dat het mogelijk is om op een stoel te zitten?



Afbeelding 1. Stoelen.Stoelen zijn gemaakt om op te zitten. Maar is het wel zo logisch dat dat kan? Foto: Sean Pathasema.

Een stoel is opgebouwd uit heel erg veel atomen. Al die atomen zijn quantumdeeltjes, en dus, zoals uitgelegd in bijvoorbeeld dit artikel, golven. Net als bij de golven die je kunt maken in de badkuip, is het niet eenvoudig om een quantumgolf te maken die stilstaat op één bepaalde plek. En zelfs als dat lukt, zou je er dan op kunnen zitten? Of zou een golf waar je

op probeert te gaan zitten eigenlijk onder je vandaan weg moeten stromen, net als het water in een badkuip?

Dat het mogelijk is om op een stoel te zitten, ook al bestaat die stoel eigenlijk uit quantummechanische golven die wegstromen als je erop drukt, is een voorbeeld van wat natuurkundigen *spontane symmetriebreking* noemen. Dit fenomeen komt veel vaker voor in de natuurkunde, en verklaart bijvoorbeeld ook het feit dat supergeleiders geen elektrische weerstand hebben, hoe de aarde aan een magnetische noord- en een zuidpool komt, en zelfs waarom alle objecten om ons heen massa hebben. In dit artikel leggen we uit wat "symmetrie" precies betekent binnen de natuurkunde, hoe een symmetrie "gebroken" kan worden, en wat dit allemaal te maken heeft met het feit dat je kunt zitten op een stoel.

Symmetrie

In het dagelijks leven komen we regelmatig dingen met een symmetrie tegen. Hoe een fietsband eruit ziet, bijvoorbeeld, verandert niet als je het wiel draait waaraan die band zit. Bij de latex handschoenenen van een dokter of tandarts ziet de rechterhandschoen er binnenstebuiten precies zo uit als de linkerhandschoen. Zelfs het menselijk lichaam is ongeveer symmetrisch, zodat je zelfs bij een foto van bekenden vaak maar moeilijk kunt zien of die via een spiegel genomen is of niet. In de natuurkunde werkt symmetrie op precies dezelfde manier. Als we een object draaien, spiegelen of binnenstebuiten keren, en het resultaat is niet te onderscheiden van het originele object, dan zeggen we dat dat object een symmetrie heeft.



Afbeelding 2. De symmetrie van een paar handschoenen. De rechterfoto laat een rechterhandschoen aan een

rechterhand zien. De linkerfoto laat dezelfde rechterhandschoen zien, maar dan binnenstebuiten gekeerd, en gedragen aan de linkerhand. Als je een paar handschoenen hebt, zien de twee handschoenen binnenstebuiten gekeerd er hetzelfde uit als beide handschoenen met de normale kant naar buiten. Bron: Orgone Research.

Behalve draaien, binnenstebuiten keren, en spiegelen, zijn er in de natuurkunde ook nog iets abstractere, meer wiskundige symmetrieën van belang. Als je bijvoorbeeld een uitgestrekt stuk touw op tafel achter laat, dan kun je zien wanneer iemand aan dat touw getrokken heeft, omdat het verplaatst zal zijn. Als je echter een oneindig lang touw neemt, dan is er geen verschil meer tussen het touw zoals jij het neerlegt, en het touw nadat iemand eraan getrokken heeft. Hoe ver je immers ook langs het touw loopt, je zult nooit bij het einde komen. En als je het uiteinde niet ziet, kun je ook niet zien of het verplaatst is. In het echt bestaan er natuurlijk geen oneindig lange stukken touw. Maar toch is dit soort abstracte symmetrie van oneindig grote objecten wel degelijk belangrijk in de natuurkunde.

Als we bijvoorbeeld denken aan het heelal, gaan we ervan uit dat het oneindig groot is. Bovendien geloven we dat het heelal in principe op alle plekken gelijk is. Dat wil zeggen: de wetten van de natuurkunde die ons zonnestelsel bij elkaar houden, zijn precies hetzelfde als de wetten van de natuurkunde die gelden voor de sterren in de Grote Beer. Als je ver weg reist in een ruimteschip verwacht je niet dat opeens de zwaartekracht een afstotende kracht wordt, of dat de snelheid van het licht verandert. Het heelal als geheel heeft dus een symmetrie. Om precies te zijn: als we alle planeten en andere ruimte-objecten weg zouden halen, dan ziet het lege heelal er op alle plekken precies hetzelfde uit, en zijn ook de wetten van de natuurkunde op alle plekken precies gelijk.

Behouden grootheden

Deze onschuldig lijkende bewering heeft onverwacht grote consequenties. Stel je bijvoorbeeld voor dat er in een verder volkomen leeg heelal één enkele planeet bestaat, en dat die planeet op dit moment een bepaalde snelheid heeft. Wat zal zijn snelheid dan zijn over een jaar? Het enige mogelijke antwoord is dat de snelheid van de planeet het hele jaar lang *onveranderd* blijft. Als de snelheid immers zou veranderen, dan moet hij dat op een bepaalde plek in het heelal doen. Maar waarom precies daar? Als iedere plek in de ruimte precies gelijk is, dan moet de planeet zich ook op elke plek op precies dezelfde manier gedragen. En dan is het dus niet mogelijk om op de ene plek wel van snelheid te veranderen

en op andere plekken niet!

Voor de oplettende lezer: het lijkt in principe ook nog mogelijk dat de planeet op elke plek in het heelal *even veel* van snelheid verandert. Deze optie is echter in strijd met een andere symmetrie van het heelal, namelijk het feit dat de wetten van de natuurkunde precies hetzelfde blijven als de tijd achteruit in plaats van vooruit zou lopen.

De symmetrie die bepaalt dat het heelal er op alle plekken hetzelfde uitziet, impliceert dus automatisch dat de snelheid van geïsoleerde objecten in het heelal behouden is. Als we iets preciezer zijn: niet de snelheid zelf, maar de *impuls* (de snelheid maal de massa) blijkt de grootheid te zijn die behouden is. De relatie tussen het bestaan van behouden grootheden en de aanwezigheid van een symmetrie is volkomen algemeen, en staat binnen de natuurkunde bekend als de *stelling van Noether*. Het wiskundige bewijs ervoor werd in 1918 gevonden door Emmy Noether. Zij liet zien dat, als de wetten van de natuurkunde op een of andere manier symmetrisch zijn, er altijd een behouden grootheid geassocieerd is met die symmetrie. Het bewijs van Noether geldt ongeacht welke natuurkundige wetten precies een symmetrie bezitten. Omdat het heelal er op alle plekken hetzelfde uitziet, weten we zeker dat er behoud van impuls moet zijn in alle mogelijke wetten van de natuurkunde die wij kennen, en zelfs in de wetten die nog ontdekt moeten worden!



Afbeelding 3. Emmy Noether (1882-1935). Foto: SPL/Photo Researchers.

Op dezelfde manier kunnen we ook andere behoudswetten afleiden uit symmetrieën van het

heelal. Het feit dat het (lege) heelal er hetzelfde uitziet ongeacht welke kant ik op kijk, betekent dat in het heelal *impulsmoment* een behouden grootheid is. En behoud van *energie* is een onvermijdbare consequentie van het feit dat de wetten van de natuurkunde op dit moment hetzelfde zijn als een jaar geleden, of een week in de toekomst.

Golven

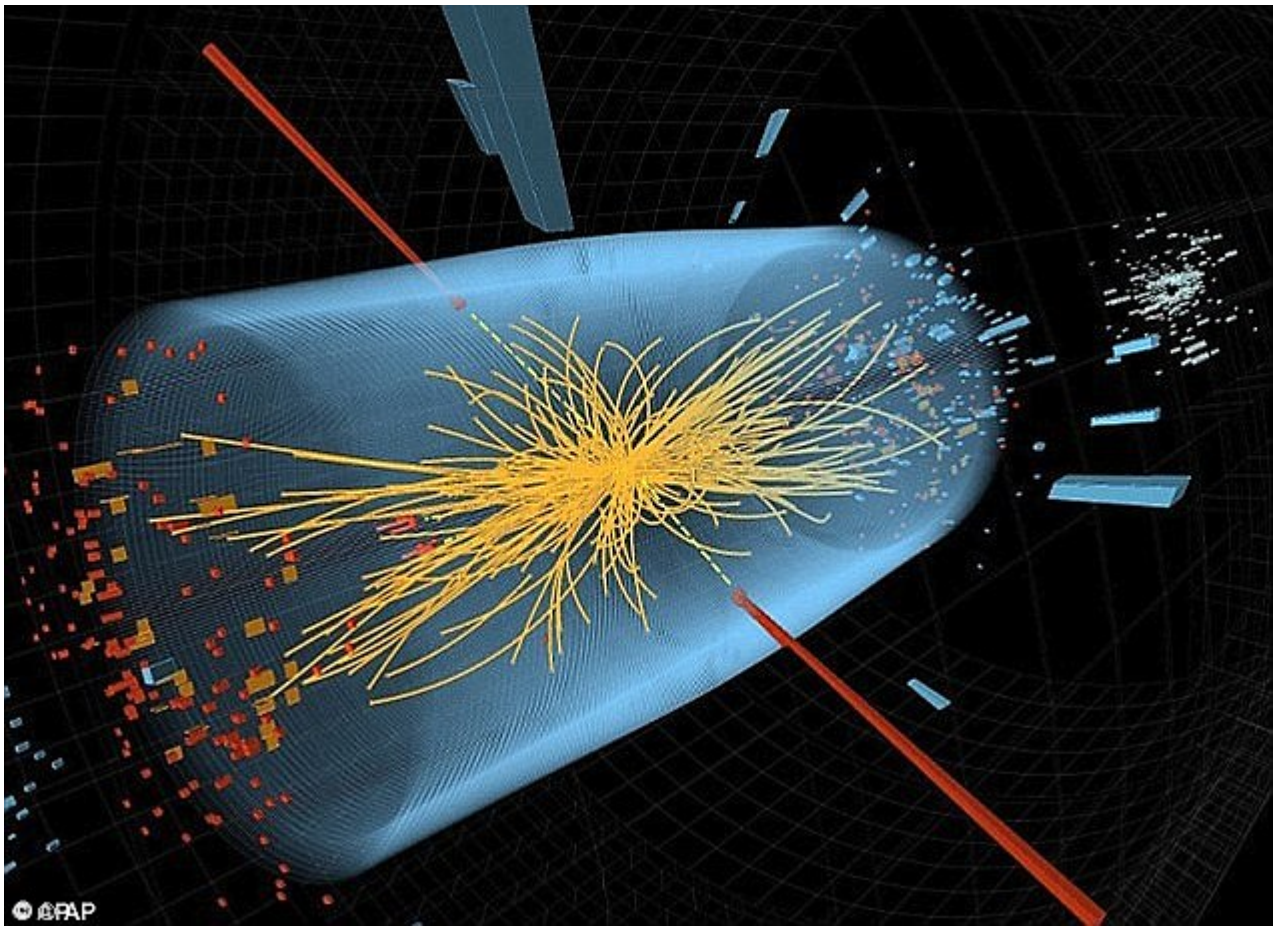
Binnen de quantummechanica is de invloed van symmetrie nog groter dan in andere delen van de natuurkunde. De reden hiervoor, is dat quantumdeeltjes geen puntdeeltjes, maar golven zijn. Als je je een leeg heelal voorstelt met daarin een enkele quantumgolf, waar zou die golf dan zitten? Iedere plek in het heelal is hetzelfde als alle andere plekken, dus waarom zou de golf wel op de ene plek zitten, en niet op de andere? Het enige mogelijke antwoord is dat de golf gelijkmatig uitgespreid moet zijn over alle plekken in het heelal. Dit kan, omdat quantumdeeltjes golven zijn, die zich net als de golven in jouw badkuip op meerdere plekken tegelijkertijd kunnen bevinden. Planeten kunnen dit niet, en daarom moet een planeet wel een plek in het heelal kiezen, ook al zijn alle plekken in principe gelijk.

In termen van symmetrie, zien we dus dat in een heelal waarin alle plekken er hetzelfde uitzien, de quantumgolven niet alleen een behouden impuls hebben (volgens Noether's theorema), maar dat die quantumgolven bovendien dezelfde symmetrie krijgen als het heelal zelf! Een golf die gelijkmatig uitgespreid is over de gehele ruimte ziet er immers ook op alle plekken hetzelfde uit. Dit principe blijkt weer een algemeen gevolg van het bestaan van symmetrie te zijn. Als de wetten van de natuur op een bepaalde manier symmetrisch zijn, dan zullen quantumdeeltjes altijd bestaan in de vorm van golven *met diezelfde symmetrie*. Het feit dat het heelal er in alle richtingen hetzelfde uitziet, betekent dus dat quantummechanische golven in het heelal er vanuit alle kanten hetzelfde uit moeten zien. En het feit dat de wetten van de natuurkunde nu hetzelfde zijn als een jaar geleden, betekent dat ook quantumgolven niet veranderen in de loop van de tijd.

Twee subtiliteiten

Maar nu lijken we toch te ver te zijn gegaan. Als quantumgolven echt altijd volledig uitgespreid zouden zijn over het hele heelal, en niet veranderen in de tijd, hoe kunnen we dan experimenten doen? Het interferentiepatroon in een dubbele-spleetexperiment bijvoorbeeld, ziet er zeker niet hetzelfde uit op alle plekken, en bij experimenten in CERN

botsen elementaire deeltjes alleen op heel specifieke tijdstippen op elkaar. De regel dat quantumgolven dezelfde symmetrie moeten hebben als het heelal, moet dus wat verder aangescherpt worden.



Afbeelding 4. Simulatie van een botsing tussen twee quantumdeeltjes. De blauwe cilinder is de lege kamer waarin de botsing plaatsvindt. De rode lijnen geven aan hoe de botsende deeltjes de kamer binnenkomen, en de gele lijnen zijn de nieuwe quantumdeeltjes die bij de botsing vrijkomen.Foto: CMS/CERN.

De eerste subtiliteit waar we rekening mee moeten houden, is hoe een quantumdeeltje een lege en symmetrische ruimte binnenkomt. De plek waarin quantumdeeltjes op elkaar botsen bij de experimenten op het CERN bijvoorbeeld, is een volledig leeg stukje ruimte. Binnen in dat lege kamertje is geen enkele positie anders dan enige andere positie, en dus zouden quantumdeeltjes in principe uitgespreid moeten zijn als een golf over de hele beschikbare ruimte. Maar als een proton of ander quantumdeeltje aan de ene kant de kamer ingeschoten wordt tijdens het experiment, zal het zich aanvankelijk vooral aan die ene kant bevinden. Als we het proton lang genoeg met rust zoden laten, spreidt het zich inderdaad als golf uit over

de hele reactiekamer. Maar in de praktijk geven we het proton daar simpelweg de tijd niet voor. De volledige meting wordt gedaan voordat het quantumdeeltje de tijd heeft gehad de symmetrie van de ruimte over te nemen.

Een tweede aspect waar we op moeten letten, is de relatie tussen meerdere quantumdeeltjes onderling. In een leeg en symmetrisch heelal met daarin *twee* quantumdeeltjes, in plaats van maar één, zijn er twee soorten positie waar we rekening mee moeten houden. Als de deeltjes bijvoorbeeld een tegengestelde elektrische lading hebben, trekken ze elkaar aan, en zullen de deeltjes zich altijd zo dicht mogelijk bij elkaar bevinden. Dit neemt echter niet weg dat de positie van de twee deeltjes samen (dat wil zeggen, de positie van het *zwaartepunt*) geen enkele reden heeft om zich in grotere mate op de ene plek in het heelal dan op de andere te bevinden. De twee deeltjes bevinden zich dus altijd heel dicht bij elkaar, maar zijn als paar uitgespreid in een golf over het hele heelal.

Het feit dat twee quantumdeeltjes op zo'n manier met elkaar verstrengeld kunnen zijn dat ze zich onderling altijd even ver van elkaar verwijderd zijn, maar als geheel een uitgestrekt golfpatroon vormen, is een echt quantumeffect. Het is gebaseerd op het feit dat als je een quantumdeeltje probeert te meten op een bepaalde plek, je altijd ofwel een volledig quantumdeeltje aantreft, ofwel niets. Het is onmogelijk om "de helft van een quantumgolf" te meten, zoals dat bijvoorbeeld wel mogelijk is met een geluidsgolf die zich uitspreidt over twee aangrenzende kamers. De ondeelbaarheid van quantumdeeltjes maakt het ook mogelijk voor een golf bestaande uit twee deeltjes om verstrengeld te zijn. Als je in zo'n verstrengelde toestand een meting doet, en één van de deeltjes ergens aantreft, verstoort de meting de golf zodanig dat het tweede deeltje óók gelokaliseerd wordt.

Het is in een verstrengelde toestand dus eigenlijk onmogelijk om de positie van het ene deeltje te meten, zonder de positie van het andere deeltje tegelijkertijd ook te meten. Op die manier kunnen twee deeltjes in elke meting altijd vlak bij elkaar aangetroffen worden, maar samen toch als een golf uitgespreid zijn over het heelal. De symmetrie die het heelal oplegt aan quantumgolven, geldt nu alleen voor de golf die het gedrag van alle deeltjes *samen* beschrijft, en niet voor afstanden tussen afzonderlijke deeltjes.

De positie van een stoel

We zijn nu aangeland bij de centrale paradox van dit verhaal. Een stoel bestaat op

microscopische schaal uit heel veel moleculen en atomen. Al die deeltjes zijn quantumdeeltjes, en volgen dus de wetten van de quantummechanica. We hebben echter net gezien dat een verzameling quantumdeeltjes die zich bevindt in een symmetrische ruimte, zich uit moet spreiden over de volledige ruimte. De deeltjes kunnen onderling een bepaalde afstand van elkaar hebben, en dus een stoel vormen, maar het zwaartepunt van de stoel moet nog steeds een uitgespreide quantumgolf zijn.

De kamer waar je je nu in bevindt, is waarschijnlijk min of meer symmetrisch. Dat wil zeggen: de wetten van de natuurkunde zijn waarschijnlijk hetzelfde in de hoek van de kamer als in het midden. Hoe kan het dan dat de stoel waar je nu op zit, zich niet als een symmetrische golf uitspreidt over de gehele kamer? Dit lijkt direct in te gaan tegen de wetten van de quantummechanica!

De reden dat grote objecten, zoals stoelen, tafels en voetballen, aan de implicaties van symmetrie op hun gezamenlijke quantumgolf lijken te kunnen ontsnappen, ligt hem in het feit dat die objecten bestaan uit echt *heel erg veel* quantumdeeltjes. De hoeveelheid atomen in een stoel is bijna onvoorstelbaar groot. Er zitten bijvoorbeeld heel veel meer atomen in de stoel waar je nu op zit, dan er zandkorrels op aarde zijn. Sterker nog, in één stoel zitten ongeveer evenveel atomen als er zandkorrels zouden zijn op tien miljoen aardes samen! Al die atomen samen vormen één enkele stoel, en het zwaartepunt van die stoel wordt beschreven door één enorme quantumgolf.

Omdat de quantumgolf van een stoel uit zoveel deeltjes bestaat, blijkt hij erg gevoelig te zijn voor verstoringen in de symmetrie van de ruimte waarin hij zich bevindt. In een volledig lege, en dus symmetrische kamer, zou zo’n verstoring bijvoorbeeld een klein deukje in de vloer kunnen zijn. Een enkel quantumdeeltje in die kamer zal zich uitspreiden als een golf over de hele kamer, maar de golf zal op de plek van het deukje net iets hoger zijn dan op andere plekken. Het deukje breekt de symmetrie van de kamer, en de quantumgolf in de kamer neemt die gebroken symmetrie over. Omdat het deukje maar zo klein is, is de verstoring in de symmetrische quantumgolf voor één deeltje ook heel klein.

Voor de quantumgolf van een stoel in dezelfde kamer, zal het deukje er ook voor zorgen dat de hoogte van de golf op de plek van het deukje versterkt wordt. Hoe groot die versterking is, hangt echter af van het aantal quantumdeeltjes in de stoel. Omdat de stoel zo ontzettend

veel deeltjes bevat, is het kleinst voorstelbare deukje al genoeg om de quantumgolf van de stoel vrijwel volledig op een enkele plek te lokaliseren. De quantumgolf wordt als het ware een quantum-tsunami, waarbij de volledige golf geconcentreerd wordt op alleen de plek van het minieme deukje.

Nadat de quantum-tsunami eenmaal gevormd is, kan hij in zijn geheel verplaatst worden. Dat will zeggen, de stoel waarop jij nu zit, is niet volledig vastgenageld op één enkele positie, alleen omdat er een microscopisch kuiltje in de vloer onder de stoel zit. Als je tegen de stoel drukt kun je hem natuurlijk uit het kuiltje halen, en op elke gewenste plek in de kamer zetten. In principe zal de quantumgolf van de stoel vervolgens als geheel terugstromen naar de plek van het kuiltje. Maar omdat de stoel uit zoveel deeltjes bestaat, gaat dat terugstromen zo enorm langzaam dat dat nooit binnen een mensenleven waar te nemen zal zijn.

Gebroken symmetrie

Het feit dat de quantumgolf van een stoel zich volledig op één plek kan bevinden in een ruimte die toch vrijwel volmaakt symmetrisch is, is een voorbeeld van wat natuurkundigen *spontane symmetriebreking* noemen. Het principe van dit effect is gemakkelijk te begrijpen door een scherp potlood te nemen, en te proberen dit op zijn punt te balanceren. Als je een mooi rond potlood hebt, dat symmetrisch is omdat het er van alle kanten hetzelfde uitziet, zou het in principe mogelijk moeten zijn om het potlood rechtop op zijn punt te laten staan. Het zou daarbij in principe niet uit moeten maken hoe scherp het potlood is.

In de praktijk zal elk potlood dat je op een scherpe punt probeert te laten balanceren echter omvallen. De reden hiervoor, is dat wij als mensen niet zo goed zijn in het precies rechtop houden van een potlood. Naarmate we het potlood scherper en scherper maken, moeten we ook steeds preciezer het potlood rechtop zetten om te zorgen dat het niet omvalt. In de wiskundige limiet van een oneindig scherp potlood, is zelfs een oneindig kleine fout in het rechtop zetten voldoende om het potlood om te laten vallen. Een oneindig scherp potlood kun je dus onmogelijk op zijn punt laten balanceren, en het is alsof het potlood spontaan omvalt. De symmetrie wordt daarbij gebroken, omdat het potlood één bepaalde kant opvalt, waarna die richting er anders uitziet dan alle andere richtingen.



Afbeelding 5. Een potlood op zijn punt laten balanceren. Bron foto: Electrolights..

In de praktijk zijn er natuurlijk geen oneindig scherpe potloden, maar de precisie waarmee een potlood rechtop gezet moet worden om het te laten balanceren, hangt sterk af van hoe scherp het potlood is. Zelfs een potlood dat met een gewone puntenslijper geslepen is, is zo gevoelig voor minimale verstoringen in het precies rechtop zetten, dat het vrijwel onmogelijk is om te voorkomen dat het omvalt. Op dezelfde manier is de quantumgolf van een stoel zó gevoelig voor minimale verstoringen in de symmetrie van de kamer, dat zelfs het kleinst voorstelbare deukje in de vloer, of de kleinst voorstelbare trilling in de lucht van de kamer, of wat voor verstoring dan ook, voldoende is om ervoor te zorgen dat de quantum golf van de stoel zich niet kan uitspreiden. Zo'n kleine verstoring is in de praktijk onvermijdbaar, en dus lijken stoelen, tafels en voetballen de invloed van symmetrie op hun quantumgolven te kunnen ontduiken. Het is alsof ze spontaan de symmetrie van de ruimte waarin ze zich bevinden, kunnen breken.

Dat objecten die bestaan uit veel quantumdeeltjes spontaan symmetrieën kunnen breken, geldt niet alleen voor stoelen en tafels die hierdoor een bepaalde plaats in de ruimte kunnen hebben. Het is ook de reden dat een magneet een noord- en een zuidpool kan hebben, en er daardoor niet hetzelfde uitziet in alle richtingen in de ruimte. En ook abstractere symmetrieën kunnen op deze manier gebroken worden. In een supergeleider, bijvoorbeeld, breekt de quantumgolf van alle elektronen samen een zogenaamde *fase-symmetrie*.

Rigiditeit

Dat een stoel geen uitgespreide quantumgolf is, maar een gelokaliseerd object, is een voorwaarde om erop te kunnen zitten. Maar het is nog niet genoeg. Je moet er ook redelijk zeker van kunnen zijn dat je, als je op de stoel gaat zitten, er niet doorheen zakt. Dat we dit een heel normale eigenschap van stoelen vinden, komt gedeeltelijk juist doordat de stoel uit zoveel microscopische deeltjes bestaat. Al die deeltjes worden met (voor onze dagelijkse begrippen) heel zwakke onderlinge krachten bij elkaar gehouden. Maar omdat we ons gewicht over zo ontzettend veel deeltjes verdelen, is de totale kracht die ze samen kunnen uitoefenen om ons te ondersteunen nog altijd erg groot.

Het verdelen van het het gewicht alleen is echter nog niet voldoende om te verklaren waarom we niet door een stoel heen zakken. De krachten tussen de microscopische deeltjes in een badkuip vol met water zijn ongeveer even groot als die tussen de deeltjes in een stoel, en toch zak je wél in het water van je badkuip weg als je erop gaat zitten, en niet in je stoel. De stoel is rigide, en het water is dat niet. Een ander manier om precies hetzelfde te zeggen is dat, als je tegen het oppervlak van het water in je badkuip drukt, alleen de moleculen direct onder je hand uit de weg geduwd worden, terwijl de rest van het water in de kuip grotendeels onaangetast blijft. Als je tegen een stoel aandrukt, werkt het precies andersom. In dat geval zal de stoel als geheel zal gaan bewegen. Dat wil zeggen: het zwaartepunt wordt verplaatst, doordat alle atomen tegelijkertijd over dezelfde afstand verplaatst worden, zonder dat daarbij de afstand tussen de atomen onderling verandert.





Afbeelding 6. Een stoel en een badkuip. Een stoel en een badkuip met water. Op de één kun je zitten, in de ander zink je weg.

Dat een stoel op deze manier reageert, is een direct gevolg van het feit dat de stoel een spontaan gebroken symmetrie heeft. De stoel als geheel is zo gevoelig voor kleine verstoringen in de symmetrie dat hij altijd gelokaliseerd zal zijn op de plek van de verstoring. Tegen een stoel aanduwen komt eigenlijk overeen met het verstoren van de symmetrie van de ruimte. Door een stoel bijvoorbeeld van je af te drukken, maak je één bepaalde richting in de ruimte anders dan alle andere richtingen. De quantumgolf van de stoel als geheel past zich ogenblikkelijk aan die verstoring aan, en beweegt als geheel in de richting waarin je drukt. Een badkuip vol met water breekt geen symmetrie (het water is uitgespreid over de gehele badkuip), en is dus ook niet op dezelfde manier gevoelig voor verstoringen van de symmetrie. Hierdoor is het water in de kuip niet rigide, en de stoel wel.

Vanuit onze ervaring in het dagelijks leven weten we natuurlijk meteen dat je in het water van een badkuip wegzakt als je erin gaat zitten. We vinden dit niet vreemd, omdat water een vloeistof is, terwijl een stoel gemaakt is van vaste stoffen. In de natuurkunde zien we dit andersom. Vaste stoffen zijn objecten die een symmetrie breken, en dus rigide zijn. Vloeistoffen daarentegen breken geen symmetrie, en kunnen zich dus uitspreiden over de hele beschikbare ruimte. Als je van een vloeistof zoals water een vaste stof zoals ijs maakt, dan breek je een symmetrie. Een ijsklontje kun je namelijk op één bepaalde plek op tafel neerleggen. Als het klontje smelt en weer een vloeistof wordt zal het zich echter symmetrisch over de hele tafel uitspreiden.

De rigiditeit die volgt uit het breken van symmetrie is weer een volkomen algemeen verschijnsel. Het staat binnen de natuurkunde bekend als het Goldstone-theorema, en verklaart bijvoorbeeld waarom de naald in een kompas in zijn geheel in de richting van het aard-magnetisch veld draait. Maar het is ook verantwoordelijk voor het feit dat alle elektronen in een supergeleider tegelijkertijd en zonder weerstand gaan stromen als je er een batterij aan koppelt. Spontane symmetriebreking is, samen met de bijbehorende rigiditeit, dus ook de eigenlijke reden dat het mogelijk is om op een stoel te zitten.