

De ideale vloeistof

Er zitten enorm veel moleculen in een glas water. Hoewel we veel weten over de fundamentele beschrijving van die moleculen, is het in de praktijk veel te ingewikkeld om water in termen van moleculen te beschrijven. In plaats daarvan gebruiken we in de natuurkunde vaak 'effectieve' theorieën, die bijvoorbeeld vloeistoffen aan de hand van grotere bouwstenen en diens symetrieën beschrijven. En kan een nieuw soort effectieve theorie ons helpen met het beschrijven van de mysterieuze quantumkritische systemen? Een artikel van gastauteur Jelle Hartong.

Natuurkunde en lengteschalen

De natuurkunde is onderverdeeld in lengteschalen. Neem bijvoorbeeld een glas water. Op voldoende kleine schaal bestaat dit uit watermoleculen die op hun beurt weer zijn opgebouwd uit atomen, die vervolgens weer bestaan uit elementaire deeltjes. Om de stroming van water te beschrijven heb je zoveel detail echter niet nodig. Het blijkt dat we net zo goed het water kunnen beschouwen als een medium dat bestaat uit kleine vloeistofelementen die aan bepaalde wetten moeten voldoen. Deze vloeistofelementen zijn dan als het ware de bouwstenen waarvan het water gemaakt is. Pas als we zouden inzoomen op zo'n vloeistofelement zien we dat het is opgebouwd uit watermoleculen. Op voldoende grote schaal doet deze fijnere structuur er niet toe en kunnen we net doen alsof die fijnere structuur er niet is.

Deze vereenvoudiging is essentieel en stelt ons in staat om systemen die uit grote aantallen deeltjes bestaan te beschrijven. Een enkel glas water bestaat al uit een enorme hoeveelheid atomen, en het zou praktisch onmogelijk zijn om de beweging van al die atomen te beschrijven. De beschrijving van water in termen van kleine vloeistofelementen in plaats van astronomische aantallen atomen is een voorbeeld van wat een effectieve beschrijving wordt genoemd. De essentie van een effectieve theorie is dat het met andere bouwstenen werkt

dan in de meer fundamentele theorie die eraan ten grondslag ligt. In het voorbeeld van het glas water werkt de effectieve beschrijving met vloeistofelementen en niet met watermoleculen.

De natuurwetten kunnen op verschillende lengteschalen sterk van elkaar verschillen. Zo zijn de wetten voor de kleinste bouwstenen, elementaire deeltjes, wezenlijk anders dan die van rondvliegende tafels en stoelen. Deeltjes zoals vrije elektronen gedragen zich volgens de wetten van de speciale relativiteitstheorie en de quantumtheorie. Daarentegen zijn tafels en stoelen onderhevig aan de regels van de klassieke Newtoniaanse mechanica. Op kleine lengteschalen gelden dus totaal andere natuurwetten dan op grotere lengteschalen. Er is wel een belangrijke eis. De theorie op kleinere schaal, die gedetailleerder is, moet de theorie op grotere schaal kunnen reproduceren. De reden hiervoor is eenvoudig. Veel watermoleculen bij elkaar vormen een plas water en dus moet de theorie voor de watermoleculen zo zijn dat als je er een vloeistof van maakt je de wetten van de hydrodynamica (de bewegingswetten voor vloeistoffen) terugvindt.



Afbeelding 1: Stromend water (bron: Bram Cymet - Flickr)

Rol van symmetrieën

In de praktijk kan het ondoenlijk lastig zijn om vanuit een microscopische beschrijving de wetten van de hydrodynamica af te leiden. Gelukkig bestaat er een veel beter uitvoerbare manier om een effectieve theorie te construeren.

Natuurkundigen houden van symmetrieën. Een reden hiervoor is dat symmetrieën het makkelijker maken om te begrijpen wat er wel en niet kan gebeuren. Het voordeel van effectieve theorieën is dat het begrip van wat precies de symmetrie-eigenschappen zijn, afhangt van de schaal waarop je naar de theorie kijkt. De truc is om op de lengteschaal waarin je geïnteresseerd bent de fysisch relevante symmetrieën te herkennen en deze zoveel mogelijk uit te melken.

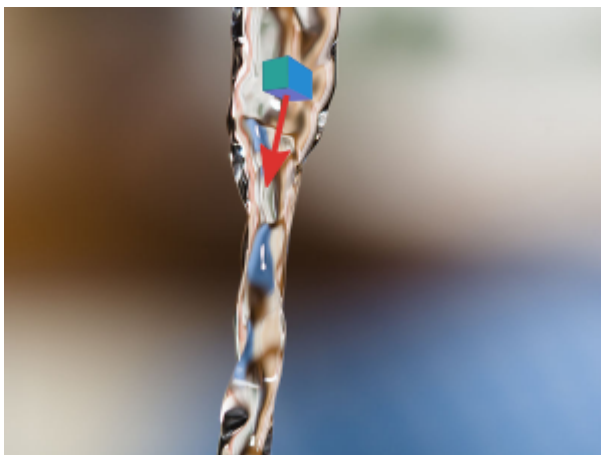
Er zijn twee types symmetrieën, materiegerelateerde en ruimtetijdsymmetrieën. Met materiegerelateerde symmetrieën bedoelen we zaken zoals behoud van lading in fysische processen. Je kan hier meer lezen over de relatie tussen symmetrie en behoudswetten. In het kort: Voorbeelden van ruimtetijdsymmetrieën zijn translatie- en rotatiesymmetrieën. Als we een geïsoleerd systeem in een verder lege ruimte verplaatsen of roteren blijven de natuurwetten onveranderd. Hetzelfde geldt voor tijdtranslatie: de wetten die een geïsoleerd systeem beschrijven zijn op enig tijdstip hetzelfde als op elk ander tijdstip. Een ruimte met dergelijke translatie- en rotatiesymmetrieën heet homogeen en isotroop. Een belangrijke fysische consequentie van het bestaan van dergelijke symmetrieën is dat ze aanleiding geven tot behoudswetten. Zo zijn bijvoorbeeld de wetten voor behoud van energie en impuls het gevolg van tijd- en ruimtetranslatiesymmetrieën. Een vloeistof in een homogene en isotrope ruimte is dus onderhevig aan dergelijke behoudswetten.

Vloeistoffen als effectieve theorieën

Om een effectieve theorie op te stellen heb je het volgende nodig: de bouwstenen van de effectieve beschrijving en de symmetrieën van het systeem. Voor een vloeistof nemen we de kleine vloeistof-elementen als bouwstenen. Deze zijn precies zo gedefinieerd zijn dat elk element afzonderlijk in thermodynamisch evenwicht is. Dat wil zeggen dat elk element een bepaalde temperatuur heeft en met een bepaalde snelheid beweegt. Deze twee grootheden kunnen voor elk element anders zijn, maar verschillen slechts minuscule van elkaar als het naburige elementen betreft. We nemen aan dat de vloeistof beweegt door een homogene en isotrope ruimte. De effectieve theorie van deze vloeistof is dan niets anders dan de verzameling van behoudswetten voor behoud van lading, energie en impuls, met als variabelen de ladingsdichtheid, temperatuur en snelheid.

De beschrijving van afzonderlijke vrije deeltjes/atomen voldoet aan een symmetrie die we

een boostsymmetrie noemen. Dit houdt in dat een deeltje zoals een atoom in rust aan dezelfde wetten voldoet als een atoom dat met een constante snelheid beweegt. De transformatie van een deeltje in rust naar een deeltje dat met constante snelheid beweegt, heet een boosttransformatie en de bijbehorende symmetrie heet een boostsymmetrie. Dergelijke transformaties gaan al terug tot de tijd van Galilei en het is dit aspect van de klassieke mechanica dat later door Lorentz en Einstein is aangepast. Als we nu te maken hebben met een vloeistof waarbij de interactie tussen de verschillende atomen zwak is, dan is ook de beschrijving van zo'n vloeistofelement boostsymmetrisch. Deze extra symmetrie legt vast hoe alles van de snelheid afhangt en zegt dat er geen verschil is tussen vloeistof-elementen die in rust zijn en vloeistof-elementen die met een constante snelheid bewegen. Het opleggen van boostsymmetrieën is dus een goede aanname waar het een vloeistof betreft die we kunnen beschouwen als een verzameling van deeltjes/atomen waartussen de interactie niet al te sterk is.



Afbeelding 2:Een vloeistofelement in een waterstraal (bewerkt van James Petts, Wikimedia)

Sterk gecorreleerde elektronensystemen en nieuwe vloeistoffen

Interacties tussen deeltjes in de natuurkunde kunnen dusdanig sterk worden dat we ze niet meer goed van elkaar kunnen onderscheiden. De verschillende deeltjes kunnen dan niet meer los van hun omgeving gezien worden. Dergelijke situaties doen zich bijvoorbeeld voor in de vaste-stoffysica waar zogenaamde sterk gecorreleerde elektronensystemen voorkomen. Het is dan niet meer mogelijk om een bepaald elektron te zien als een deeltje in een effectieve achtergrond die het effect van de aanwezigheid van alle andere elektronen beschrijft. Dergelijke situaties doen zich voor in zogenaamde quantumkritische systemen.

Een voorbeeld van dergelijke systemen zijn hogetemperatuur-supergeleiders. Hier kun je met gemak een heel artikel op zich over schrijven. Wat voor hier alleen van belang is, is dat er een sterk vermoeden bestaat dat dergelijke sterk gecorreleerde elektronensystemen vloeistofgedrag zónder boostsymmetrie kunnen vertonen.

Vloeistoffen waarbij de snelheid van een vloeistof-element niet meer bepaald wordt door de aanwezigheid van een boostsymmetrie zijn tot voor kort niet bestudeerd. Het niet meer opleggen van een bepaalde boostsymmetrie leidt tot een nieuwe klasse van vloeistoffen die kunnen helpen bij het beschrijven van quantumkritische systemen. Met een dergelijk nieuw vloeistofmodel kunnen we in de toekomst mogelijk een aantal belangrijke eigenschappen van quantumkritische systemen beschrijven en komen we hopelijk een stapje dichterbij een begrip van wat zich tussen die supergeleidende elektronen afspeelt.