

Maxwells demon

De statistische fysica wordt vaak gezien als een fundamentele tak van de natuurkunde. Welk systeem we ook bekijken: zolang het is opgebouwd uit een grote hoeveelheid deeltjes kunnen we er statistische regels op toepassen om zo een benaderde beschrijving te geven van hoe het systeem in elkaar zit, en om voorspellingen te maken over de toekomst van het systeem.



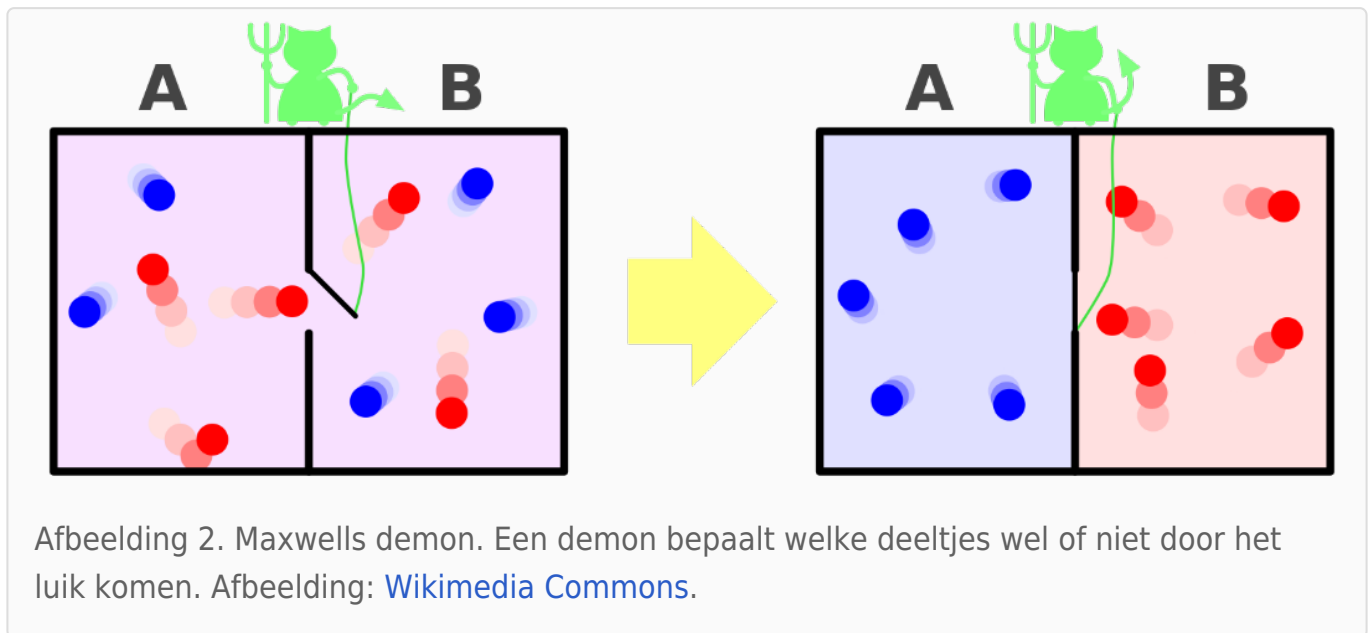
Afbeelding 1. Maxwells demon? In tegenstelling tot deze duivel is Maxwells demon niet noodzakelijk kwaadaardig. Afbeelding: [Max Pixel](#).

Zo zijn er voor de thermodynamica, de studie van fysische systemen met veel deeltjes zoals gassen en vloeistoffen, met behulp van de statistische fysica drie fundamentele hoofdwetten opgesteld. Hiervan is de tweede hoofdwet misschien wel de bekendste: de entropie van een systeem neemt altijd toe. Anders gezegd: na verloop van tijd zal het systeem zich altijd

bevinden in de meest waarschijnlijke toestand. Een ijsklontje zal altijd smelten in een glas water, en een scheutje melk zal zich altijd vermengen met de koffie.

In 1927 zei de Britse natuurkundige Arthur Eddington tijdens een van zijn colleges het volgende: “Als je theorie de tweede wet van de thermodynamica tegenspreekt, dan kan ik je geen hoop geven; het kan niet anders dan dat ze in diepste vernedering bezwijkt.” Eddington was niet de enige die er zo over dacht. Ook Albert Einstein was ervan overtuigd dat de wetten van de thermodynamica nooit omver geworpen zullen worden. Toch kun je je afvragen of zij wel gelijk hadden: zijn deze wetten van de thermodynamica eigenlijk wel zo fundamenteel en universeel geldend?

Om dit uit te zoeken, bespreek ik in dit artikel een gedachte-experiment dat in 1876 werd bedacht door de natuurkundige James Clerk Maxwell. We beginnen met een container gevuld met gas. De container is met behulp van een afscheiding opgesplitst in twee delen, laten we zeggen: links en rechts. In die afscheiding zit een luik dat open- en dichtgeschoven kan worden. Maxwell stelde zich voor dat er een demon bestaat (vaak vertaald als ‘duiveltje’, maar Maxwells demon is niet noodzakelijk kwaadaardig) die controle heeft over dit luik, en het open en dicht kan schuiven wanneer hij dat wil. Zo kan hij heel snelle deeltjes van de linker kamer naar de rechter kamer laten passeren, maar alle langzame deeltjes in de linker kamer gevangen houden. Omgekeerd zou hij ervoor kunnen kiezen om juist de langzame deeltjes in de rechter kamer door het luik naar de linker kamer te laten bewegen, maar de snelle deeltjes uit die rechter kamer tegen te houden. Zo verandert na een tijdje de temperatuur in de twee delen van de doos. Doordat er zich steeds meer snelle deeltjes, en steeds minder langzame deeltjes, in de rechter kamer bevinden, wordt die kamer warmer en warmer. Andersom wordt de linker kamer steeds koeler, omdat hier steeds meer langzame deeltjes en steeds minder snelle deeltjes rondbewegen.



Wat we zien in dit gedachte-experiment is dat warmte zich verplaatst van een koude ruimte naar een warme ruimte, zonder dat er energie wordt toegevoegd aan het systeem. Het systeem gaat dus van een heel waarschijnlijke, evenwichtige toestand naar een veel minder waarschijnlijke toestand. Met andere woorden: na verloop van tijd neemt de entropie van het systeem af! Een schending van de tweede hoofdwet van de thermodynamica, dus. Betekent dit dat de geldigheid van die tweede hoofdwet toch niet zo'n zekerheid is?

Maxwell vond dat zijn gedachte-experiment had aangetoond dat de tweede hoofdwet alleen als een statistische wet geldig is: het is niet *onmogelijk* dat de entropie van een systeem (tijdelijk) afneemt, maar het is wel ontzettend *onwaarschijnlijk*. (Zie bijvoorbeeld ook ons artikel over [Boltzmannbreinen](#)). In het geval dat de demon met zekerheid de warmte van de koude ruimte naar de warme ruimte verplaatst, en daarmee ervoor zorgt dat de entropie afneemt, is de tweede hoofdwet van de thermodynamica dus niet geldig.

Tegenwoordig wordt het gedachte-experiment van Maxwell ook wel anders uitgelegd, namelijk in termen van informatie. Entropie kun je namelijk ook zien als een maat voor informatie: hoe lager de entropie, hoe meer informatie we hebben over de toestand waarin het systeem zich kan bevinden: onwaarschijnlijke toestanden zijn er namelijk per definitie

minder dan waarschijnlijke toestanden! In het geval van ons gedachte-experiment moet de demon informatie kunnen verzamelen over de beweging van de deeltjes om te beslissen wanneer hij het luik zal openen. Bovendien moet hij zich deze informatie na de meting ook nog kunnen herinneren: hij moet de informatie kunnen opslaan. Maar als we er nu van uitgaan dat het geheugen van de demon net als dat van jou en mij niet oneindig is, dan zal er een punt komen waarop er informatie gewist moet worden uit zijn geheugen, zodat hij nieuwe metingen kan blijven doen. Door het wissen van de herinneringen van de demon neemt de entropie van het systeem sterk toe: zo sterk, dat de entropie door het verzamelen van de informatie over de deeltjes meer zal stijgen dan dat die zal dalen door de snelle en langzame deeltjes van elkaar te scheiden. Doordat dat de informatie gewist moet worden uit het geheugen van de demon, betaalt hij dus de prijs voor zijn trucje met het luik.

Maxwells gedachte-experiment leert ons dus niet alleen iets over de tweede wet van de thermodynamica, maar ook over het belang van de informatietheorie. Het laat ons zien dat je, wanneer je erg veel informatie hebt over de manier waarop deeltjes in een container zich bewegen, het systeem zo kan organiseren als je zelf wilt. Maar zolang het geheugen van je meetapparaat eindig is, zal de entropie uiteindelijk tóch altijd toenemen, en dus kan je niet ontkomen aan de tweede hoofdwet van de thermodynamica – zelfs niet als je een demon bent.

In de zomerperiode publiceert de QU-site elke vrijdag een artikel. In september gaan we weer terug naar het schema van twee artikelen per week: elke dinsdag en elke vrijdag.