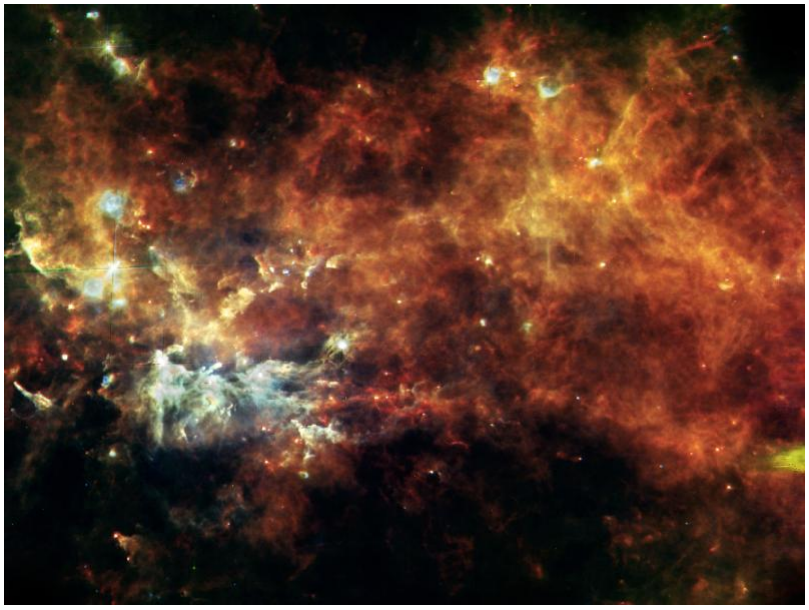
Entropie (7): Klopt de Tweede Hoofdwet wel?

Dit is het zevende artikel in het dossier Entropie. In het zesde artikel in dit dossier zagen we wat entropie en de richting van de tijd met elkaar te maken hebben. Zoals we inmiddels hebben gezien, neemt de entropie van een geïsoleerd natuurkundig systeem volgens de Tweede Hoofdwet alleen maar toe. Die toename van entropie betekent dat het systeem van een minder waarschijnlijke naar een meer waarschijnlijke macroscopische toestand gaat. In het algemeen zal dat betekenen dat de "gelijkmatigheid" in het systeem toeneemt.

Soms wordt deze eigenschap van entropie ook als volgt geformuleerd: een *toename* van de entropie betekent een *afname* van de "orde" in het systeem. Denk bijvoorbeeld aan een leegstromende gasfles: in de toestand van lage entropie bevinden alle atomen zich in de gasfles. Er is dan dus meer orde dan wanneer de gasfles is leeggelopen en het grootste deel van de atomen zich op een willekeurige plek in de kamer bevindt. Of denk aan ijs en water, waar de toestand van lage entropie (een ijskristal) duidelijk meer orde vertoont dan de toestand met hoge entropie (vloeibaar water, waarin de moleculen kriskras door elkaar bewegen).

Toch is het soms verwarrend om over entropie na te denken in termen van "orde" en "chaos". We hebben deze termen tot nu toe dan ook vermeden. Er zijn namelijk ook systemen waarin de orde in de loop van de tijd juist spontaan lijkt toe te nemen. Als we in gedachten "entropie" gelijk stellen aan "wanorde", lijkt het er dus op dat in zo'n systeem de entropie *afneemt*. Dat zou natuurlijk in tegenspraak zou zijn met de Tweede Hoofdwet. We zullen echter zien dat ook in dergelijke systemen de entropie nog altijd toeneemt.



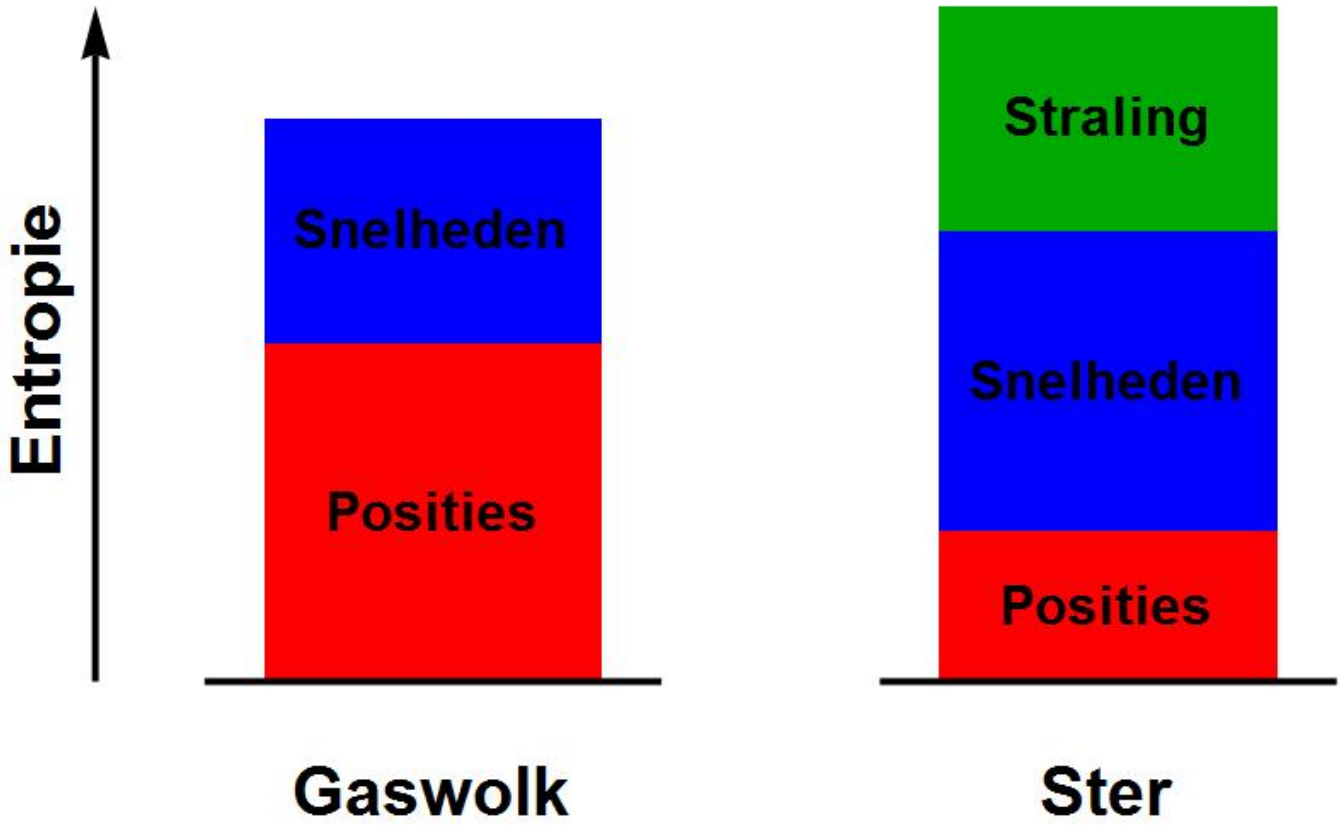
Afbeelding 1. Een stervormingsgebiedGaswolken zoals deze (een stervormingsgebied in het sterrenbeeld Vosje) trekken langzaam samen, totdat compacte sterren gevormd worden. De sterren lijken veel "geordender" dan de gaswolk. Toch neemt ook in dit proces de entropie niet af. (Foto: NASA.)

De oorzaak van dit tegenintuïtieve gedrag is de zwaartekracht. Een belangrijk voorbeeld van hoe de zwaartekracht de schijnbare orde kan laten toenemen, noemden we al in het inleidende artikel in dit dossier. Onze zon is zo'n vijf miljard jaar geleden ontstaan uit een wolk van stof en gas. Deze gaswolk trekt door zijn eigen zwaartekracht samen, totdat de dichtheid en daardoor de temperatuur van het gas zo hoog zijn dat kernfusie gaat plaatsvinden, en de compacte bol van gas als een ster licht en warmte gaat uitstralen.

De orde in het systeem lijkt daarbij fors te zijn toegenomen. Uit een grote, chaotische wolk van gas is een veel compactere ster ontstaan. Ook in termen van entropie lijkt er iets mis te zijn: de atomen in de ster bevinden zich in een veel kleinere ruimte dan die in de gaswolk, en dus lijkt het "aantal" mogelijke toestanden (posities) van de atomen veel kleiner geworden. Betekent dat niet, in tegenspraak met de Tweede Hoofdwet, dat de entropie van dit geïsoleerde systeem juist is *afgenomen*?

Een eerste stap naar de oplossing van dit raadsel ligt in de *snelheden* van de atomen. De gaswolk trekt samen doordat de atomen naar binnen getrokken, en dus versneld worden. De atomen gaan sneller bewegen, en de temperatuur van het gas neemt toe. Sneller bewegende atomen hebben een groter aantal mogelijke toestanden: als de gemiddelde snelheid van de atomen toeneemt, zal de spreiding in die snelheden ook toenemen, en daarmee dus het

“aantal” mogelijke toestanden. Hoewel het aantal mogelijkheden voor de *positie* voor de atomen dus afneemt, zal het aantal mogelijkheden voor de *snelheid* toenemen.



Afbeelding 2. Een gaswolk en een sterAls een gaswolk samentrekt tot een ster neemt de entropie in de posities van de atomen sterk af. De entropie in de snelheden van de atomen neemt toe, maar niet genoeg om de afname in de positie-entropie te compenseren. Pas als we ook de entropie van de straling die het systeem uitzendt meetellen, zien we dat de totale entropie niet afneemt. Overigens straalt ook de koude gaswolk natuurlijk een kleine hoeveelheid straling uit; die minimale hoeveelheid straling hebben we in deze afbeelding verwaarloosd.

Toch blijkt dit argument nog niet genoeg om de Tweede Hoofdwet te redden: de toename van de entropie als gevolg van de hogere snelheden, is niet genoeg om de afname van de entropie als gevolg van het kleinere volume te compenseren. Er speelt zich bij het samentrekken van de gaswolk echter nog een proces af: de opwarmende wolk zal (infrarode) straling uitzenden, en die straling neemt natuurlijk ook een bepaalde entropie met zich mee. Met de nodige wiskunde blijkt dat, als we de entropie van de straling optellen bij de toename van de entropie door de snelheden van de atomen, de totale entropie precies genoeg is om de afname van de entropie door het kleinere volume te compenseren. De totale entropie

neemt dus *niet* af (en als de straling op haar beurt de omgeving weer opwarmt zelfs toe), en dus is ook in dit geval de Tweede Hoofdwet gewoon geldig.

Kortom: “orde” is, zeker in voorbeelden waarin de zwaartekracht een rol speelt, een wat onduidelijk begrip. Het kan dus gevaarlijk zijn om over “toenemende entropie” na te denken als “afnemende orde” of “toenemende chaos”. In een voorbeeld als dit blijkt pas dat entropie inderdaad toeneemt als we de entropie in *alle* componenten van het systeem (hier: posities, snelheden en straling) in onze redenering meenemen. Door alleen te kijken naar “orde” zien we dergelijke componenten snel over het hoofd.

Overigens leidt de combinatie van entropie en zwaartekracht tot nog veel meer enorm interessante natuurkunde. In het volgende artikel in dit dossier zullen we daar kort een ander voorbeeld van bespreken: de entropie van zwarte gaten. Veel meer over de fascinerende rol die entropie speelt in de theorie van de zwaartekracht, valt binnenkort te lezen in een nieuw artikel over entropische zwaartekracht.

Dit is het zevende artikel in het dossier Entropie. In het achtste en laatste artikel bespreken we de fascinerende rol die entropie speelt in de natuurkunde van zwarte gaten.