

## **Entropie op lokale schaal: waarom de Big Bang niet genoeg is**

### ***Inleiding***

De basisvraag van dit essay is: hoe is het mogelijk dat wij toestanden waarnemen waarin de entropie in de tijd toeneemt? De vraag waarom de entropie hoger wordt als hij laag is zal ik hierbij buiten beschouwing laten, ik wil met name ingaan op de vraag hoe toestanden van lage entropie kunnen ontstaan en blijven bestaan.

In besprekingen van de richting van de entropietoename wordt regelmatig verwezen naar de toevallige omstandigheid dat we nu eenmaal toestanden met lage entropie hebben. Voor een verklaring van deze toestand wordt dan verwezen naar de begintoestand van het universum. Blijkbaar is daar het antwoord te vinden.

Ik wil in dit essay betogen dat het voorkomen van gebieden met een lage entropie in het begin van het universum wel noodzakelijk maar niet voldoende is om nu het voorkomen van toestanden met lage entropie mogelijk te maken, en wat dieper ingaan op invloed die de lokale omstandigheden op de aarde hebben op het soort processen dat we feitelijk waarnemen.

### ***Het vraagstuk van de entropietoename***

De tweede hoofdwet van de thermodynamica leert ons dat de entropie van een geïsoleerd systeem wel kan toenemen in de tijd, maar nooit afneemt. Als we bijvoorbeeld een druppel inkt in een glas water laten vallen, verspreidt hij zich, en er ontstaat nooit opeens een druppel inkt in een glas water. Er bevindt zich dus een tijdsrichting in deze wet. Maar alle processen binnen zo'n systeem zijn tijdssymmetrisch: iedere beweging van elk molecuul kan, volgens onze natuurwetten, ook in de omgekeerde richting plaatsvinden. De vraag is dan hoe het mogelijk is dat een verzameling tijdssymmetrische processen tot een tijdsasymmetrisch totaal kan leiden.

Het antwoord hierop heeft mijns inziens twee aspecten, waarbij de eerste een noodzakelijke maar niet voldoende voorwaarde voor de tweede is: het ontstaan van gebieden met een lage entropie vanuit de begincondities van het heelal, en het telkens ontstaan van tijdelijke hoogenergetische toestanden door de aanwezigheid van zelforganiserende systemen.

Maar laten we eerst eens wat beter kijken naar het soort systemen waarin we entropietoename waarnemen. Hoe geïsoleerd kan een systeem eigenlijk zijn?

### ***Geïsoleerde systemen?***

Entropie is gedefinieerd binnen een geïsoleerd systeem. Als van buiten het systeem energie wordt toegevoerd, kan dat de entropie van een systeem wel degelijk af doen nemen. De standaardoplossing hiervoor is om in

dergelijke gevallen naar het grotere systeem te kijken dat bestaat uit het oorspronkelijke systeem plus het andere systeem waar de energie vandaan komt. Voor dit totale systeem geldt dan wel weer dat de entropie nooit daalt. Maar kunnen we in het algemeen wel zo'n totaal systeem vinden waarvoor de externe invloed voldoende verwaarloosbaar is? Het is in ieder geval duidelijk dat hier een mogelijkheid aanwezig is om systemen met lage entropie te creëren: externe interactie.

Horwich stelt: "We may suppose that whatever the exact explanation of entropic phenomena might be, it is likely to have something to do with the fact that the systems undergoing one-way processes are *not* perpetual and *not* isolated systems"[Horwich 1987].

Dit is een belangrijke opmerking: een systeem dat enige tijd geïsoleerd is geweest is naar een toestand van maximale entropie geëvolueerd; alleen systemen die recent in interactie zijn geweest met andere systemen kunnen een lage entropie hebben. Helaas komt Horwichs uitwerking niet toe aan de vraag hoe in de praktijk het niet-geïsoleerd zijn van een systeem zou kunnen zorgen voor .

Horwich noemt wel de door Lebowitz et al. geopperde mogelijkheid dat een zwakke koppeling met zwaartekracht de oorzaak is van het niet afnemen van entropie: "Their idea is that the entropy asymmetry exists because even those systems that we regard as "almost isolated" cannot escape the reach of gravitational fields and other interfering forces"[Horwich 1987], maar hij wijst die af. Deze afwijzing is wel terecht: de zwaartekracht lijkt mij binnen het soort systemen dat op aarde voorkomt niet de meest relevante invloed. Bovendien heeft Horwich gelijk met zijn punt dat op deze manier ook de asymmetrie niet opgelost wordt. Ik heb zelf ook mijn twijfels of het überhaupt mogelijk is om deze asymmetrie direct uit de natuurwetten af te leiden, maar dat valt buiten dit essay. Waarschijnlijk is hier de zwaartekracht gekozen vanwege de principiële onmogelijkheid om systemen ervan af te schermen. De principiële onmogelijkheid van afscherming is alleen uitsluitend noodzakelijk als de entropierichting zuiver uit de natuurwetten moet volgen. Zodra het om voorwaarden voor werkelijk bestaande systemen gaat, blijkt dat het thermodynamisch isoleren van systemen in principe dan wel mogelijk mag zijn, maar in de praktijk ook een idealisatie is die nooit voor langere tijd voorkomt, en zeker niet bij het soort systemen die op menselijke schaal voorkomen, grofweg binnen het zonnestelsel.

Horwich noemt nog een tweede punt: "There is a further respect in which the systems we actually observe are different from permanently isolated systems. This is their *short duration*"[Horwich 1987]. Horwich gebruikt verder Reichenbachs term "branch system" voor deze systemen.

Dit punt is al veel relevanter. Een systeem dat wij in entropie zien toenemen moet immers op een gegeven moment op zijn maximum aankomen. Ook hier blijft echter de vraag open hoe dat soort systemen dan ontstaat, en hoe ze blijkbaar blijven ontstaan. Als de systemen die wij werkelijk waarnemen allemaal kortdurend zijn, moeten ze telkens opnieuw

ontstaan, en energie moet zich telkens opnieuw concentreren. Een instabiele toestand die we nu waarnemen moet ofwel recent ontstaan zijn, ofwel tot recent in stand gehouden zijn.

Maar ook situaties waarin telkens nieuwe dingen ontstaan kunnen hun basis in het verre verleden hebben liggen. Laten we dus eerst de andere kant van de zaak bekijken: wat kan het begin van het heelal ons over de stijging van entropie zeggen?

### ***Het begon met een Big Bang***

Een alternatieve aanpak van de vraag waarom we situaties tegenkomen waarin de entropie kan toenemen, is te verwijzen naar een specifieke begintoestand van ons universum, een toestand van (zeer) lage entropie, of minstens met bepaalde gebieden die een lage entropie hebben. Deze specifieke begintoestand maakt een tijdsasymmetrische situatie mogelijk zonder dat het noodzakelijk is die asymmetrie ook in de natuurwetten terug te vinden. Horwich vat een gedeelte van het standpunt van Boltzmann samen als "Initially, systems are often in low entropy states (because our region of the universe is currently in a state of low entropy)" [Horwich 1987]. Ook Price verwijst hiernaar als hij zegt: "On this view, then, there's no time-asymmetric factor which causes entropy to increase. This is simply the most likely thing to happen, given the combination of the time-symmetric Boltzmann probabilities and the single low entropy restriction in the past" en "The puzzle of the thermodynamic arrow is really the puzzle of the low entropy boundary condition"[Price 2002].

Op deze manier lijkt het probleem van de tijdsasymmetrie opgelost: de wetten zijn symmetrisch maar de randcondities niet. Maar is dit ook voldoende voor het nu optreden van toestanden van lage entropie? Het heelal heeft per slot van rekening minstens 10 miljard jaar de tijd gehad waarin de entropie alleen is toegenomen. En de specifieke toestanden van lage entropie die wij nu tegenkomen bestonden toen niet. Die druppel inkt die wij in het water laten vallen is over het algemeen niet meer dan een paar jaar oud. Misschien zijn die begincondities noodzakelijk, maar kan een dermate specifieke toestand direct volgen uit iets wat miljarden jaren geleden gebeurd is, of hebben we meer nodig?

### ***Entropie, homogeniteit en de rol van de zwaartekracht***

Op deze plaats wil ik een terzijde plaatsen over het verband tussen entropie en homogeniteit.

Het is opvallend dat als voorwaarde voor het ontstaan van situaties van lage entropie zowel de homogeniteit (Price) als de inhomogeniteit (Horwich) van het vroege heelal genoemd worden. Price stelt: "The crucial thing is that matter is distributed *extremely smoothly* in the early universe. This provides a vast reservoir of low entropy, on which everything else depends" en "the matter involved manages to avoid forming large agglomerations (in fact, black holes)" [Price 2002, mijn cursivering]. Horwich vat de verklaring van entropietoename met gebruik

van de Big Bang "very crudely" samen als: "In the beginning the expansion of the universe was faster than the rate of equilibration, thus creating pockets of low entropy" en stelt dan "so local *concentrations* of energy were formed"[Horwich 1987, mijn cursivering]. Volgt lage entropie nu uit grote homogeniteit, of juist uit energieconcentratie?

Als de zwaartekracht verwaarloosbaar is heeft een volkomen homogeen systeem een maximale entropie, maar op kosmologische schaal is dat niet het geval. Een volkomen homogeen systeem bezit namelijk gravitatieenergie. Een zwart gat heeft een hogere entropie dan een homogene verdeling van massa, want de homogene verdeling zal zich onder de invloed van de zwaartekracht samentrekken en zich uiteindelijk spontaan omzetten in een zwart gat.

Maar de zwaartekracht heeft hier een dubbele werking: als de homogeen verdeelde massa zich gaat samentrekken, wordt weliswaar de totale entropie van het gebied groter, maar de materie wordt ook dichter bij elkaar gebracht, zodat de effectieve ruimte waarin het proces plaatsvindt kleiner wordt. En dit verlaagt op lokale schaal de entropie juist weer.

Laten we beginnen met een zeer groot homogeen systeem, zeg een interstellaire gaswolk, dat door de zwaartekracht samentrekt. Hierbij komt veel energie vrij, maar deze energie is homogeen over het systeem verdeeld. In een later stadium is de materie geconcentreerder, zodat deze zelfde hoeveelheid energie vrijkomt in een kleiner gebied. De totale energie van het gehele gebied wordt lager maar de maximale energieconcentratie wordt hoger. Op een bepaald punt is de wolk zover samengetrokken dat we het beter een ster kunnen noemen (en er ook kernfusie kan gaan optreden, maar behandeling hiervan reikt weer buiten de grenzen van mijn essay). Hier is de totale energieinhoud van het systeem al behoorlijk opgebruikt (oftewel de entropie is al aardig toegenomen), maar de lokaal bruikbare energieoutput is hoog. Als we naar het hele oorspronkelijke systeem kijken dan zien we dat alleen niet omdat grote gedeelten ervan nu volkomen leeg zijn. Price stelt "Low entropy requires concentrations of energy in useable forms"[Price 2002]. Maar een systeem kan een lage entropie hebben zonder dat de energie op dit moment al bruikbaar is, omdat er een lokale concentratie nodig is. Lage entropie impliceert een voorraad energie die uiteindelijk bruikbaar is, niet per sé energie die direct beschikbaar is.

De aanwezigheid van systemen zoals de zon, die energie in bruikbare vorm leveren, is afhankelijk van het homogeen zijn van het universum op een vroeg tijdstip, anders was het geen zon maar een zwart gat. We hebben relatief langzaam vrijkomen van energie nodig.

### ***De toestand in ons zonnestelsel: energietoevoer***

We hebben nu gezien dat de begincondities van het heelal gunstig waren om de zon (en vergelijkbare sterren) te produceren. En deze zon heeft essentiële invloed op de toestand van de aarde door er voortdurend straling naar toe te zenden .

De wereld die wij waarnemen is er namelijk niet een die in thermodynamisch evenwicht is of er op korte termijn naartoe onderweg is. De wereld die wij zien is er een waar voortdurend energie wordt toegevoerd, door de zon. Ook Price ziet het belang van de zon in: "most familiar irreversible phenomena depend on the sun" [Price 2002], maar hij ziet dat vooral als een uitgestelde uitwerking van de condities van lage entropie in vroegere tijden. Ik vind dat de processen die zich op dit moment afspelen ook een eigen rol te spelen hebben.

Door de constante toevoer van energie blijft de totale entropie van het systeem 'aarde' ruwweg constant. De entropie van het zonnestelsel als geheel neemt wel toe, doordat de zon andere energievormen omzet in warmte en die warmte zich vervolgens verdeelt, maar de aarde als systeem verandert niet van toestand. Ze houdt ongeveer dezelfde temperatuur (en voor zover ze dat niet doet heeft het ook voornamelijk met zelforganisatie te maken, waarover later meer), en er valt ook niet vol te houden dat andere processen systematisch ordelijker of wanordelijker worden.

Het is dus bijvoorbeeld ook niet zo dat, zoals Price stelt, "entropy is much higher now than it was in the sixteenth century (as we normally assume that century to have been)" [Price 2002]. De wereld is niet sinds de zestiende eeuw verder naar een statische evenwichtstoestand geëvolueerd, ze heeft zich gehandhaafd in hetzelfde dynamisch evenwicht. Price zou gelijk hebben als hij het niet zou hebben over de entropie van de wereld (die wereld waar Shakespeare in rondliep) maar over de entropie van het gehele zonnestelsel (of nog groter) als systeem. Die is uiteraard wel toegenomen maar lokaal merken we dat niet; dat zijn grotendeels interne aangelegenheden van de zon. Onze aarde is sinds de zestiende eeuw niet gehomogeniseerd.

### ***De toestand in ons zonnestelsel: zelforganisatie***

Maar er is nog meer aan de hand dan evenwicht dat niet statisch maar dynamisch is. We zouden gewoon stralingsevenwicht kunnen hebben, een systeem waarin er telkens evenveel energie uitgestraald wordt als er binnenkomt, maar waar verder geen verandering optreedt, en waar geen lokale concentraties van energie optreden.

Maar binnen het dynamisch evenwicht dat we op deze aarde hebben, komen weer specifieke processen voor die energie concentreren. Een opvallend voorbeeld (maar niet het enig mogelijke) is het voorkomen van levende wezens. Voor het bestaan van levende wezens is het weliswaar noodzakelijk dat er energie beschikbaar is, maar levende wezens gaan wel actief op zoek naar energie, met name in de vorm van voedsel en warmte. Er zijn processen gaande die de energie van de zon gebruiken om bepaalde chemisch of fysisch instabiele toestanden te creëren of te handhaven. We kunnen hier bijvoorbeeld denken aan het creëren van suikers, het vormen van zoutoplossingen met een hogere of lagere

concentratie dan die in de omgeving, of aan het handhaven van een lichaamstemperatuur die boven de omgevingstemperatuur ligt.

Het zou me veel te ver buiten het onderwerp van dit essay brengen om ook maar enigszins in te gaan op de vraag hoe levende wezens dat precies doen, maar het is een onontkoombaar feit dat levende wezens, zolang ze nog leven, toestanden kunnen handhaven die zonder actief ingrijpen niet stabiel zijn. Dat is ook te zien aan de desintegratie die optreedt zodra ze doodgaan. Ze hebben daar energie voor nodig, en een berekening van een dier of plant tezamen met zijn directe omgeving zal laten zien dat de totale entropie van het systeem afneemt, maar ze produceren actief plaatselijke energievoorraden.

En hier hebben we dus de gevraagde toestanden met lage entropie. Of die druppel inkt die in het glas water valt nu is gecreëerd door een inktvis, een plant of een fabriek, er is actief ingegrepen. De energie die de zon ons heeft geleverd is niet terechtgekomen in een systeem dat direct daarna weer zijn temperatuur is gaan middelen met zijn omgeving, of in een systeem dat uitsluitend in stralingsevenwicht is: het is terechtgekomen in een systeem dat een vorm van organisatie heeft, een systeem dat zichzelf handhaaft tegen het verval in. Zonder zulke systemen zouden we de geen ordelijke situaties hebben die daarna weer tot wanorde kunnen vervallen. Het is duidelijk dat, om zo'n situatie te verkrijgen, het noodzakelijk is dat het heelal een begintoestand met lage entropie heeft, anders is de benodigde energietoevoer direct al onmogelijk. Maar is zo'n begintoestand ook voldoende?

### ***Volgt de toestand op aarde uit de begincondities van het heelal?***

Als het heelal voldoende homogeen begonnen is, en dat is het blijkbaar, kunnen er sterren van het type van de zon ontstaan: sterren die langere tijd een tamelijk constante hoeveelheid energie leveren, sterren dus met een voldoende geleidelijke toename van entropie. Het is het bestaan van dit soort sterren die het mogelijk maakt om omstandigheden als die van de aarde te hebben, waarin er een constante energietoevoer is. Het voldoende lang bestaan van dergelijke omstandigheden maakt weer het ontstaan van zelforganiserende systemen mogelijk. En dergelijke systemen zijn verantwoordelijk voor het telkens opnieuw ontstaan van lokale situaties met een lagere dan maximale entropie. En die situaties zijn de toestanden van lage en vervolgens toenemende entropie die wij waarnemen, de inktdruppel en het glas water, het huis dat daarna een ruïne wordt, de spijker die kan verroesten.

Ik wil hier nadrukkelijk stellen dat het hier niet gaat om het waarnemen an sich, om het feit dat er mensen (of andere wezens) zijn die waarnemen. Het is zeker niet mijn bedoeling om het antropisch principe door een achterdeur naar binnen te halen. Het gaat om het feit dat er systemen zijn die zichzelf in niet-evenwichtstoestanden creëren en handhaven, en als bijeffect ook externe situaties creëren die energiehoudend zijn.

Maar het moge ondertussen duidelijk zijn dat de aanwezigheid van gebieden met lage entropie vlak na de Big Bang bij lange na niet voldoende is. Het is eveneens noodzakelijk dat deze gebieden niet te snel evolueren, aangezien er een systeem moet ontstaan dat gedurende enige tijd energie toegevoerd krijgt. Ook is het noodzakelijk dat er een of andere vorm van zelforganisatie bestaat aangezien er anders een toestand ontstaat van weliswaar dynamisch maar toch onveranderlijk en homogeen evenwicht, een toestand waarin de entropie alleen theoretisch kan toenemen. Zonder deze situatie zou de tweede hoofdwet van de thermodynamica nog wel waar zijn, maar, zelfs afgezien van het feit dat we dan niet zouden bestaan, zou het niet mogelijk zijn om ooit een als zodanig herkenbare entropietoename waar te nemen.

### ***Conclusie***

Het is om de door ons waargenomen toestanden waarin de entropie toeneemt mogelijk te maken dus wel noodzakelijk, maar niet voldoende dat we het heelal een begintoestand met lage entropie heeft gehad. Er zijn nog meer voorwaarden. Het telkens opnieuw optreden van lokale toestanden met lage entropie is mogelijk door het bestaan van zelfhandhavende systemen, en die kunnen alleen bestaan door de (semi-) permanente toevoer van zonnenergie naar de aarde. En dat is weer mogelijk doordat de zon niet alleen begonnen is in een begintoestand van lage entropie, maar ook een specifieke ontwikkeling naar een toestand van maximale entropie doormaakt, een waarin ze gedurende lange tijd een constante hoeveelheid energie afgeeft. Het gaat niet alleen om het ontstaan van gebieden met lage entropie, maar ook om het enige tijd blijven bestaan van dergelijke gebieden, en om het lokaal ontstaan en zich handhaven van energieconcentraties ten koste van de totale entropie in een groter gebied. Als deze processen zich niet voordoen zijn er geen situaties mogelijk waarin de entropie merkbaar kan toenemen.

### ***Gebruikte literatuur***

Horwich, Paul: *Asymmetries in Time: Problems in the Philosophy of Science*, MIT Press, 1987.

Price, H. *The thermodynamic arrow: puzzles and pseudo-puzzles*, Forthcoming in *Proceedings of Time and Matter*, Venezia, 2002, World Scientific.