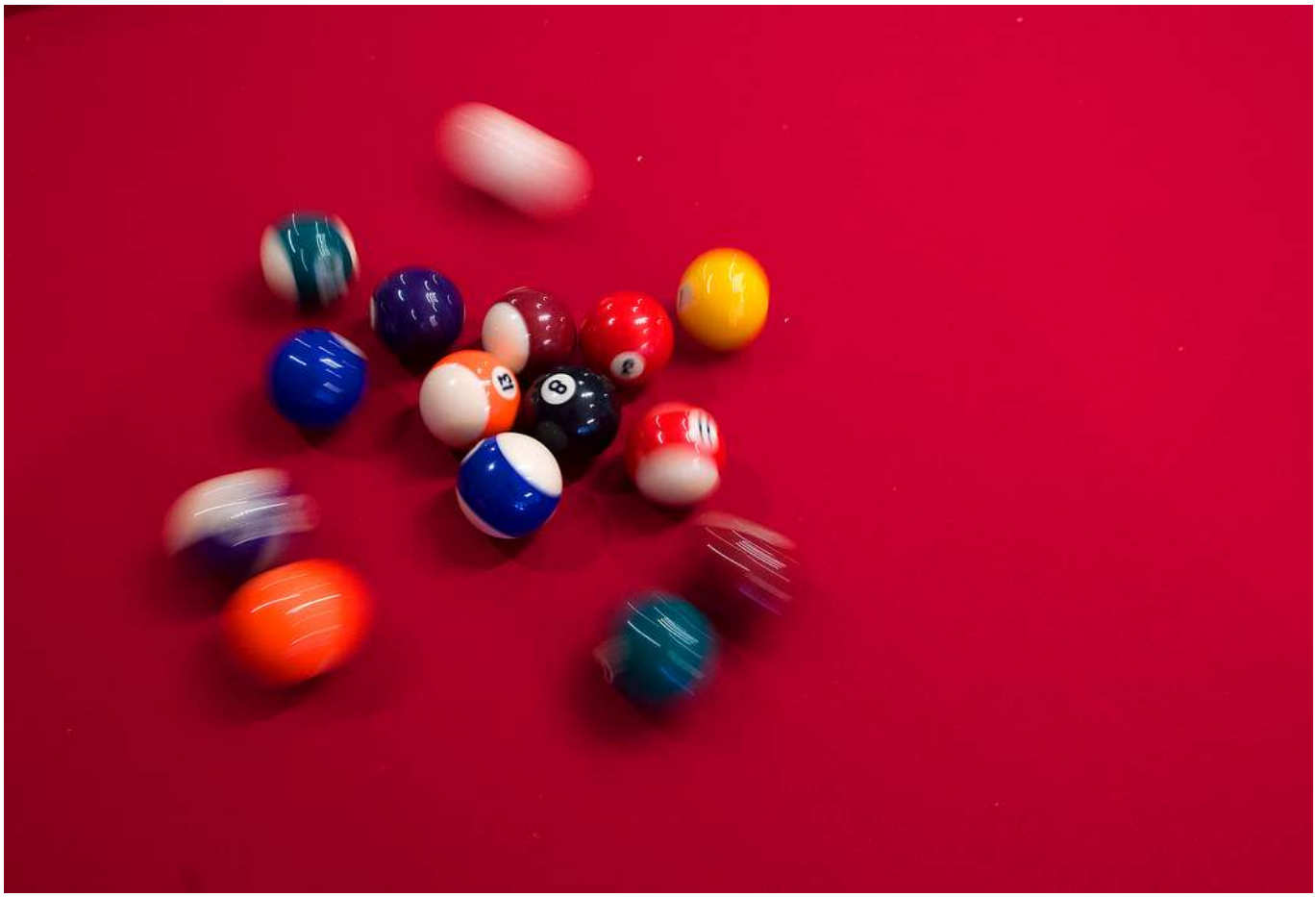
Met de tijd mee

De geschiedenis van onomkeerbaarheid in de natuurkunde

Heb jij je ooit afgevraagd waarom je wel van een ei een omelet kunt maken, maar niet van een omelet een ei? Dat lijkt misschien een onnozele vraag, totdat je beseft dat de meeste fundamentele vergelijkingen van de natuurkunde zelf geen “pijl van de tijd” bevatten: als je zo’n vergelijking opgelost hebt, dan blijkt de tijdsomkering van deze oplossing net zo goed een oplossing. Dat de wereld om ons heen daarentegen door onomkeerbare processen wordt gekenmerkt, vormt een van de centrale spanningen in de geschiedenis van de natuurkunde.



Afbeelding 1. Omkeerbaar of niet?Vrijwel alle natuurwetten staan toe dat processen ook omgekeerd in de tijd kunnen plaatsvinden. Toch ziet een achterwaarts afgespeelde film van bijvoorbeeld een partij biljart er niet heel “natuurlijk” uit. Later in dit artikel zien we hoe Ludwig Boltzmann en zijn tijdgenoten al fel bediscussieerden of processen met botsende bollen omkeerbaar zijn of niet. Afbeelding via Picryl.

Presocraten en de overwinning van Sparta

In de 6e eeuw v.Chr. ontstonden er in het door Grieken bewoonde Ionië, aan de westkust van het huidige Turkije, stadstaten waar burgers hun geld verdienden met handel in plaats van het bezit van grond. Hierdoor geloofde men dat de sleutel tot meer welvaart lag in het vergaren van kennis, wat leidde tot een grote interesse in wetenschap. Eén gebied waar bij uitstek veel vooruitgang werd geboekt was de astronomie, bijvoorbeeld door Anaxagoras, die eclipsen verklaarde, een belangrijke bevestiging van het feit dat de maan en de aarde hemellichamen zijn die licht kunnen blokkeren op dezelfde manier als lichamen op aarde dat kunnen.

Waarom was de wetenschappelijke vooruitgang in Ionië juist zo groot op het gebied van de astronomie? Hier zijn verschillende verklaringen voor. Zo waren de sterren van groot belang voor de navigatie van handelsschepen, en was er bovendien geen straatverlichting waardoor mensen een groot deel van de tijd niets anders konden zien dan de sterrenhemel. Een andere verklaring is dat de hemel zich kenmerkt door periodieke bewegingen, terwijl dit bij de meeste bewegingen op aarde niet het geval is. Deze periodieke bewegingen maakten het makkelijker om patronen te herkennen en dus om wetenschappelijke ontdekkingen te doen. Volgens Democritus, een Griekse denker uit Abdera in Thracië die leefde van ca. 460 tot ca. 370 v.Chr., was het ogenschijnlijk fundamentele verschil tussen aardse bewegingen en bewegingen in de ruimte echter schijn; hij geloofde dat zowel aardse als hemelse bewegingen berusten op lichamen die zich door het *kenon*, de leegte, verplaatsen. Het enige verschil is dat de lichamen die op aarde materie vormen, die hij atomen noemde, zo klein zijn dat we ze niet kunnen zien en zo vaak botsen dat er geen orde in te vinden is.

Plato, Democritus’ tijdsgenoot en leerling van Socrates, walgde van het idee dat wat wij waarnemen het resultaat van willekeurige botsingen kan zijn en niet van de goddelijke voorzienigheid. Volgens een latere overlevering zou Plato zelfs hebben gewenst dat alle

boeken van Democritus verbrand zouden worden. Plato's leerling Aristoteles formuleerde een alternatieve geocentrische theorie om het ogenschijnlijke verschil tussen bewegingen in de ruimte en op aarde te verklaren. Aristoteles maakte hierbij onderscheid tussen de ondermaanse bol, waar materie aan verandering onderhevig is, en het onveranderlijke bovenmaanse gebied. Omdat kometen, waarvan de Grieken wisten, op een zeer onregelmatige wijze werden waargenomen, concludeerde Aristoteles dat deze ondermaans moeten zijn. In werkelijkheid bevinden kometen zich vrijwel altijd in het bovenmaanse en zou het nauwkeurig bestuderen van kometen dus kunnen leiden tot de falsificatie van Aristoteles' geocentrische model. Echter, toen Aristoteles zijn kosmologische model formuleerde, was Athene reeds in handen van de Spartanen gevallen, en hadden Plato en Aristoteles de waarneming ondergeschikt gemaakt aan metafysische verklaringen. Met uitzondering van de korte bloeiperiode van het vroege Alexandrië, tussen 300 en 145 v.Chr., zou de gehele wereld bijna tweeduizend jaar lang gedomineerd worden door rijken die niet in wetenschap maar enkel in onderdrukking geïnteresseerd waren. Hierbij kwamen de ideeën van Plato en Aristoteles goed van pas.

Van Kepler naar Newton

In de 14e eeuw werd Europa getroffen door de Zwarte Dood, die ongeveer een derde van de bevolking doodde. Hierdoor werd grond overvloedig en arbeid schaars. Deze ontwikkeling zorgde voor economische vrijheid en vergrootte bovendien de behoefte aan slimme innovaties die arbeid efficiënter konden maken. Door deze en andere ontwikkelingen — zoals de val van het Byzantijnse Rijk, waarna geleerden naar West-Europa vluchtten, en het machtsvacuüm in verschillende Italiaanse steden — kwam de wetenschap in de 16e eeuw weer op gang. Net als in het Ionië van de 6e en 5e eeuw v.Chr. speelde de astronomie een centrale rol in deze wetenschappelijke revolutie. Aan het begin van de zeventiende eeuw ontdekte Johannes Kepler, die in Praag voor Tycho Brahe werkte maar anders dan zijn leermeester het heliocentrische wereldbeeld aanhing, op basis van Brahe's uiterst nauwkeurige waarnemingen van Mars dat planeten geen cirkelvormige, maar elliptische banen om de zon beschrijven en daarbij sneller bewegen naarmate zij de zon dichter naderen. Aan het einde van de 17e eeuw liet Newton met de door hemzelf ontwikkelde calculus zien dat deze regels volgen uit algemene bewegingswetten, gecombineerd met de aanname dat de zwaartekracht een omgekeerde-kwadratenwet volgt: staat een object bijvoorbeeld twee keer zo ver weg van het middelpunt van een ster of planeet, dan ervaart

het daarvan een vier keer zo zwakke zwaartekracht.

Afbeelding 2. Meetinstrument Armillarium van Tycho Brahe. Afbeelding uit 1598, door Brahe zelf, van een van zijn meetinstrumenten. Afbeelding via Wikimedia Commons.

Dat Newton voor het opstellen van zijn bewegingswetten Keplers inzichten over bovenmaanse bewegingen nodig had en niet genoeg had aan de overvloedige ondermaanse meetresultaten, kwam doordat, zoals de Ioniërs eerder ondervonden, ondermaanse bewegingen vaak geen regelmatige patronen vertonen, maar door wrijving, botsingen en andere verstoringen vervallen. Dit verval maakt bewegingen *onomkeerbaar*, oftewel: zulke bewegingen zijn zodanig dat de omgekeerde beweging onnatuurkundig is. Hemellichamen bewegen daarentegen in een vacuüm, Democritus' kenon. Daarom is ook de tijdsomkering van de baan van een hemellichaam natuurkundig – als de maan bijvoorbeeld de andere kant

op om de aarde heen zou draaien zou ook die beweging “normaal” op ons overkomen en aan alle natuurwetten voldoen. Met Newtons ontdekking dat de baan van Mars berekend kan worden, werd onomstotelijk aangetoond dat één en dezelfde natuurkunde zowel bovenmaanse als ondermaanse bewegingen beschrijft. Daarmee werd de barrière die onomkeerbaarheid voor de vooruitgang van de ondermaanse natuurkunde had gevormd voorgoed doorbroken.

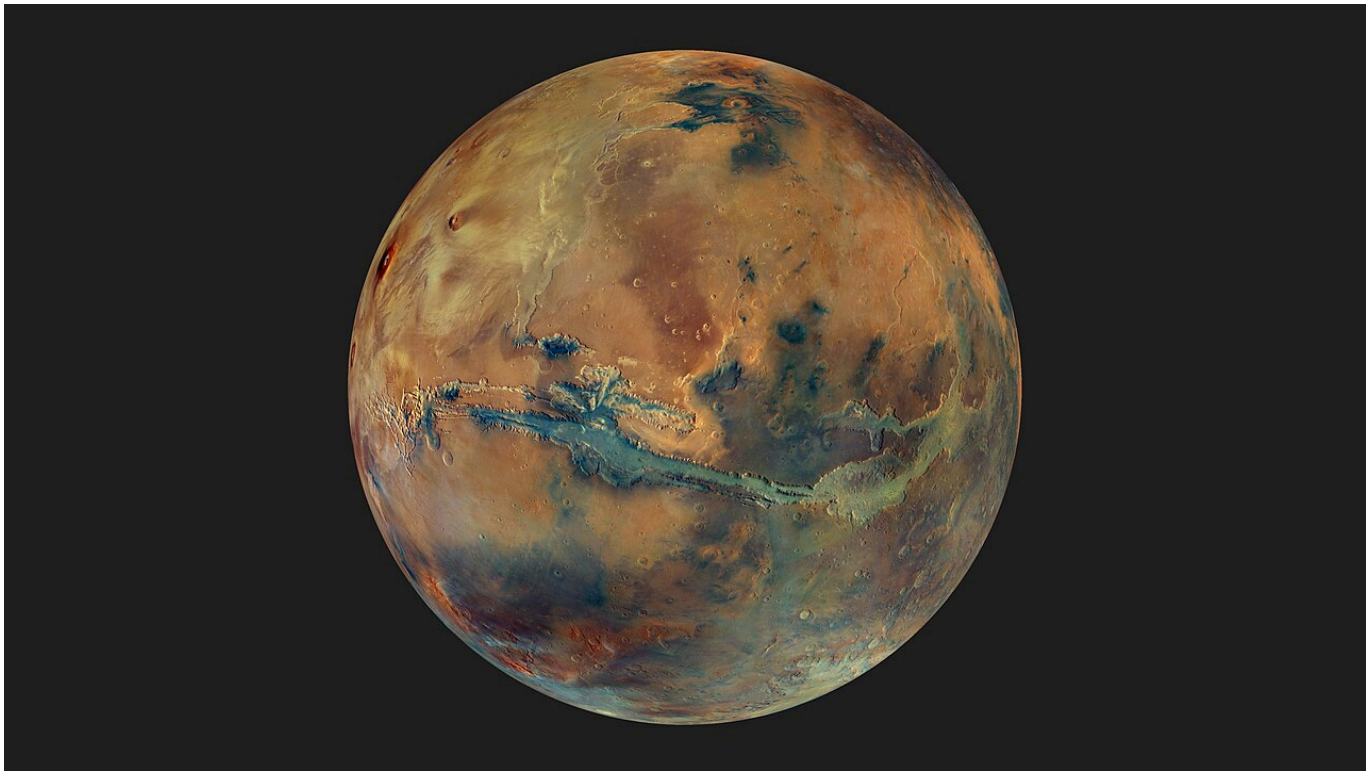
Het was Newton zelf die de ondermaanse onomkeerbaarheid voor het eerst in een algemene wiskundige vorm vastlegde, door aan te nemen dat de wrijvingskracht evenredig is met de snelheid. In hedendaagse notatie:

$$\large m \frac{d^2 \bf{x}}{d t^2} = – c \frac{d \bf{x}}{dt}.$$

Deze zogeheten differentiaalvergelijking beschrijft hoe een lichaam met massa m door wrijving met een in het referentiekader stilstaande omgeving wordt vertraagd; *c* is de wrijvingsconstante. Aan beide zijden van deze vergelijking staan tijdsafgeleides die aangeven hoe snel positie **x** verandert. Eén tijdsafgeleide van positie **x** geeft snelheid en twee afgeleiden geven versnelling. Aan de linkerkant staat een even aantal tijdsafgeleides en aan de rechterkant een oneven aantal. Het gevolg hiervan is dat de oplossing van deze differentiaalvergelijking, aangenomen dat *c* positief is, exponentieel verval vertoont. Zo zal een slinger in aanwezigheid van wrijving een steeds kleinere uitwijking vertonen, en de afname is exponentieel. Als je de tijd omkeert bij dit proces, is er sprake van exponentiële groei, een onnatuurkundige oplossing. Vergelijk nu deze vergelijking met de tweede bewegingswet van Newton in aanwezigheid van een constante kracht ***F***:

$$\large m \frac{d^2 \bf{x}}{dt^2} = \bf{F}.$$

Omdat deze differentiaalvergelijking een even aantal tijdsafgeleides heeft aan de rechter- en linkerzijde (links twee, rechts nul) en niet aan één kant even en de ander oneven, zal de oplossing ervan omkeerbaar zijn. Dit is eenvoudig te bevestigen door een bal in de lucht te gooien en te constateren dat, wederom frictie negerend, de bal op een gelijksoortige manier zou bewegen als de tijd omgekeerd zou zijn.



Afbeelding 3. Mars. Kepler bestudeerde de baan van Mars. Na Newtons werk kon deze baan ook wiskundig begrepen worden. Mars beweegt door een vrijwel perfect vacuüm en ervaart dus geen wrijving – daardoor zou de omgekeerde baan van de planeet volgens Newtons wetten ook mogelijk zijn. Afbeelding gemaakt door de Mars Express, credits: ESA/DLR/FU Berlin/G. Michael.

Continuümmechanica en thermodynamica

De 18^{e} eeuw was de eeuw van Leonhard Euler. Euler werd in 1707 in Bazel geboren. Op dertienjarige leeftijd begon hij aan de universiteit, waar Johann Bernoulli hem onderwees, waarna Euler de rest van zijn leven doorbracht als wetenschapper in Sint-Petersburg en Berlijn. Naast zijn vele grote wiskundige ontdekkingen leverde Euler een cruciale bijdrage aan de natuurkunde. Waar de natuurkunde in Newtons tijd beweging voornamelijk beschrijft in termen van afzonderlijke lichamen, begreep Euler dat dit tekortschiet bij continue materie, zoals stromende vloeistoffen en vervormbare elastische materialen. In dergelijke gevallen is het veel handiger om in plaats van formules voor lichamen, formules voor *velden* op te stellen. Zo stelde hij de eerste bewegingsvergelijking voor een vloeistof op:

$$\large \rho \frac{D \bf{u}}{D t} = – \nabla p$$.

Het symbool ∇ is hierin een verkorte notatie die alle ruimtelijke afgeleiden bevat.

Net als eerder kun je de tijdsafgeleides aan beide kanten tellen om te controleren of deze vergelijking onomkeerbaarheid beschrijft. Aan de linkerzijde staat de tijdsafgeleide van vloeistofsnelheid, die zelf een tijdsafgeleide van de verplaatsing van de vloeistof is. Dus is het aantal afgeleiden aan beide zijden even, wat de vergelijking omkeerbaar maakt. Dit verklaart waarom deze vergelijking alleen geldig is voor een *perfecte vloeistof*: een vloeistof zonder wrijving met zichzelf. Euler was in de eerste plaats een wiskundige en zoals gold voor vele wiskundigen na hem, was onomkeerbaarheid iets wat hem niet goed lag. Dit blijkt ook uit het actieprincipe dat Euler samen met Lagrange formuleerde, waarmee bewegingsvergelijkingen voor lichamen of velden systematisch afgeleid kunnen worden; dit actieprincipe is alleen geldig voor omkeerbare bewegingen.

Desalniettemin is het mogelijk om een formule op te stellen voor de wrijving van een veld met zichzelf, iets wat we *diffusie* noemen. In 1822 stelde Fourier een warmtevergelijking op die diffusie van warmte beschrijft. Eveneens in 1822 stelde Navier een vergelijking op voor de diffusie van impuls in een vloeistof, oftewel viscositeit. Dit deed hij door de vergelijking van Euler voor perfecte vloeistoffen met een viskeuze term uit te breiden. Deze vergelijking kennen we nu als de Navier-Stokesvergelijking:

$$\large \rho \frac{D \bf{u}}{D t} = - \nabla p + \eta \nabla^2 \bf{u}.$$

De term met viscositeit η heeft een oneven aantal tijdsafgeleides en dus zijn onomkeerbare oplossingen mogelijk. Het vinden van zulke oplossingen is echter allesbehalve eenvoudig. Door haar extreem brede toepasbaarheid en enorme complexiteit wordt de Navier–Stokesvergelijking, twee eeuwen na haar formulering, nog altijd door duizenden natuurkundigen onderzocht.

Naast vergelijkingen voor diffusie van warmte en impuls werden ook andere diffusievergelijkingen ontwikkeld zoals die voor concentraties in een oplossing (wet van Fick) en voor lading (wet van Ohm). Wat al deze vergelijkingen verbindt, is dat ze een proces beschrijven waarbij een niet-uniforme toestand met exponentieel verval naar een uniforme toestand evolueert, wat steeds vergt dat het teken van de coëfficiënt die deze onomkeerbare beweging beschrijft het juiste is voor verval in plaats van groei. Niet lang nadat deze en andere diffusieve vergelijkingen opgesteld werden, werd de thermodynamica ontwikkeld die een verklaring bood voor het consistente teken van deze coëfficiënt. De verklaring is dat

entropie, een grootheid die beschrijft hoe waarschijnlijk een macroscopische toestand is, niet kan afnemen, en uniforme toestanden een grotere entropie hebben dan niet-uniforme toestanden, waardoor materie op grote schaal alleen naar een uniforme toestand kan bewegen. Dit is de tweede wet van de thermodynamica, die je ook wel de onomkeerbaarheidswet zou kunnen noemen.

De driefrontenoorlog van Boltzmann

De tweede wet van de thermodynamica stelt dat entropie niet kan afnemen, maar zegt niets over hoe entropie toeneemt. Ludwig Boltzmann, geboren nabij Wenen in 1844, wilde dit begrijpen. Dit deed hij door in de voetsporen van Democritus te treden en materie te beschouwen als een grote hoeveelheid botsende deeltjes. Hij stelde een vergelijking op, de Boltzmannvergelijking, die de evolutie van de waarschijnlijkheidsverdeling *f* van deeltjes als functie van de positie ***x*** en snelheid ***v*** beschrijft:

$$\large \frac{\partial f}{\partial t} + \bf{v} \cdot \nabla f = C[f] .$$

Aan de rechterzijde staat de botsingsintegraal *C*[*f*], die door Boltzmann werd uitgewerkt door deeltjes te zien als harde bollen, waardoor op basis van de dichtheid van deeltjes voor een gegeven impuls de kans op een botsing meetkundig berekend kan worden. Omdat de botsingsintegraal geen tijdsafgeleides bevat, terwijl aan de linkerzijde van de Boltzmannvergelijking één tijdsafgeleide staat, laat de vergelijking in beginsel onomkeerbare evolutie toe. Om aan te tonen dat haar oplossingen inderdaad een voorkeursrichting in de tijd hebben, introduceerde Boltzmann een van *f* afhankelijke grootheid: de H-functionaal.

$$\large H[f] = \int f \ln f \; {\rm d}^3 x \, {\rm d}^3 v .$$

Boltzmann bewees dat, met inachtneming van zijn Boltzmannvergelijking, de H-functionaal niet kan toenemen als functie van tijd in een mate die gegeven wordt door de botsingsintegraal uit de vorige vergelijking. Omdat bovendien de entropie op een teken na met deze H-functionaal overeenkomt, betekent dit dat de entropie van Boltzmanns harde bollen niet kan afnemen. Oftewel: Boltzmann slaagde erin om de tweede wet van de thermodynamica af te leiden op basis van microscopische dynamica, door materie statistisch te benaderen als botsende deeltjes.

Afbeelding 4. Ludwig Boltzmann. Een portret van Boltzmann op 58-jarige leeftijd. Afbeelding via Universität Wien

Een revolutionaire ontdekking die Boltzmann in een klap een van de meest gevierde natuurkundigen in heel Europa maakte, zou je wellicht denken. In plaats daarvan kwam Boltzmann van drie kanten onder vuur te liggen. De eerste tegenwerping kwam van zijn vriend Josef Loschmidt, en was inhoudelijk de scherpste. Hij wees Boltzmann op wat nu de Loschmidtparadox heet: de botsingswetten bezitten *microscopische omkeerbaarheid*. Keer je alle snelheden om, dan loopt het systeem in principe terug op een wijze die beschreven wordt door precies dezelfde botsingswetten. Hoe kan uit zulke botsingen dan toch onomkeerbaarheid ontstaan, zoals een entropie die alleen maar toeneemt? De verklaring voor deze ogenschijnlijke paradox is dat bij het opstellen van de Boltzmannvergelijking een aanname is gedaan die later de *Stosszahlansatz* genoemd werd, oftewel de botsings-tellingsaanname. Deze aanname houdt in dat de deeltjes voor een botsing gedecorreleerd zijn – in zekere zin: “nog niets van elkaar afweten” – terwijl dit na de botsing niet meer zo is, waardoor ondanks microscopische omkeerbaarheid een onderscheid tussen het moment voor en na de botsing gemaakt wordt. Een eenvoudige oplossing voor dit probleem bestaat echter

niet, omdat zonder deze aanname de Boltzmannvergelijking niet sluitend is.

Naast Josef Loschmidt waren er de wiskundigen, die zoals eerder vermeld geen groot fan van onomkeerbaarheid waren. Gewapend met het herhalingstheorema van Poincaré, dat bewijst dat ieder afgesloten systeem binnen een eindige tijd terugkeert naar zijn begintoestand, beweerde Zermelo dat Boltzmanns microscopische bewijs van onomkeerbaarheid niet klopt, aangezien het universum per definitie een afgesloten systeem is en dus omkeerbaar moet zijn.

Naast wiskundigen die geloofden dat onomkeerbaarheid niet werkelijk bestond, waren er tenslotte ook de energetici, een invloedrijke maar uiteindelijk doodlopende stroming aan het einde van de negentiende eeuw. Zij ontkenden het bestaan van atomen en meenden dat op microscopische schaal alleen energie werkelijk fundamenteel was. Daarmee verwierpen zij Boltzmanns verklaring van de thermodynamica uit de statistische beweging van atomen en maakten zij van entropie een op zichzelf staande, fundamentele grootheid.

De uitzonderlijk negatieve ontvangst van zijn ideeën, samen met zijn algemeen depressieve aard en gezondheidsproblemen, droegen ertoe bij dat Boltzmann in 1906 een eind aan zijn leven maakte, een paar jaar voordat Jean Perrin onomstotelijk bewees dat materie gevormd wordt door botsende deeltjes.

Van alle drie de bezwaren tegen de Boltzmannvergelijking bleef alleen dat van Loschmidt na de eeuwwisseling nog relevant. Omdat met de opkomst van de quantummechanica natuurkundigen leerden dat deeltjes op de kleinste schaal geen harde bollen zijn, waren het vooral de wiskundigen die zich voor de Boltzmannvergelijking interesseerden. Dit begon al met David Hilbert die in 1900 tijdens het Internationale Congres voor Wiskundigen in Parijs de volgens hem 23 belangrijkste problemen voor de 20^{e} eeuw opsomde, waarvan het zesde het volledig begrijpen van de limiet van botsende deeltjes naar continuümmechanica betrof. Hoewel er sindsdien door wiskundigen veel aan het beter begrijpen van de Boltzmannvergelijking is gewerkt en dit werk zelfs met meerdere Fieldsmedailles is bekroond, is het zesde probleem van Hilbert nooit echt opgelost. Althans, niet tot 2024. In augustus 2024 verscheen een tweehonderd pagina’s tellend werk van de aan de Universiteit van Chicago werkzame wiskundigen Yu Deng, Zaher Hani en Xiao Ma waarin zij beweren Hilberts zesde probleem definitief opgelost te hebben. Dit werk is in maart van vorig jaar

gepubliceerd in *Annals of Mathematics*.

Onomkeerbaarheid in de 20e eeuw

In de 20e eeuw raakte de ontwikkeling van de natuurkunde in een stroomversnelling en ook hierbij speelde onomkeerbaarheid een belangrijke rol.

Diffusie van warmte betekent dat een warmtestroom ontstaat als gevolg van een niet-uniforme temperatuur, terwijl diffusie van lading betekent dat een niet-uniforme elektrochemische potentiaal een ladingsstroom veroorzaakt. Ook kruiseffecten zijn mogelijk. Zo kan een temperatuurgradiënt een ladingsstroom opwekken, het Seebeck-effect, terwijl een gradiënt in de elektrochemische potentiaal een warmtestroom kan veroorzaken, het Peltier-effect. In de negentiende eeuw werd uit metingen duidelijk dat deze twee effecten aan elkaar gekoppeld zijn. Lars Onsager liet in 1931 zien dat zulke relaties algemeen voortvloeien uit de microscopische omkeerbaarheid van de onderliggende dynamica: dezelfde omkeerbaarheid die ook geldt voor de botsingen tussen de harde bollen van Boltzmann. Voor deze fundamentele bijdrage aan de thermodynamica van onomkeerbare processen ontving Onsager in 1968 de Nobelprijs voor Scheikunde.

Vanuit zijn ballingschapsoord in Dublin schreef de quantumpionier Erwin Schrödinger in 1944 het boek *What Is Life?* waarin hij zich onder andere bezighield met de vraag hoe het bestaan van levende wezens, dat een voortdurende ordening van materie vereist, zich verhoudt tot de tweede wet van de thermodynamica, die eist dat materie enkel wanordelijker kan worden. Schrödinger, die in het jaar van Boltzmanns dood aan de Universiteit van Wenen begon te studeren, legde uit dat dit komt doordat er bij de ordening van materie in levende wezens altijd een minimale hoeveelheid verbranding komt kijken die de entropie zodanig doet toenemen dat de netto entropie van het ordeningsproces altijd positief is. Als je deze “huishoud-entropie” buiten beschouwing laat, lijkt het dus alsof levende wezens de tweede wet van de thermodynamica schenden. Dit idee, dat materie die onderhevig is aan een continu verbrandingsproces niet beperkt wordt door de tweede wet van de thermodynamica, vormt de basis voor wat nu *actieve materie* heet, een onderwerp dat tegenwoordig een aanzienlijk deel van de *klassieke natuurkunde* beslaat, oftewel de natuurkunde die geen betrekking heeft op quantummechanica of algemene relativiteit.

Afbeelding 5. Erwin Schrödinger. Schrödinger, bij velen vooral bekend vanwege de naar hem genoemde vergelijking of door de kat van Schrödinger, hield zich ook bezig met de vraag hoe het bestaan van levende wezens te rijmen valt met het nooit afnemen van entropie. Afbeelding: Nobel Foundation, via Wikimedia Commons.

In de jaren 70 ontdekten Stephen Hawking en Jacob Bekenstein dat zwarte gaten een entropie hebben die berekend kan worden. Deze entropie groeit kwadratisch met de massa, wat betekent dat volgens de tweede wet van de thermodynamica het vallen van materie in een zwart gat een onomkeerbaar proces is. Ondanks dat de Einsteinvergelijkingen, de vergelijkingen voor zwaartekracht, net als alle fundamentele vergelijkingen omkeerbaar zijn, kan zwaartekracht hierdoor onomkeerbaarheid vertonen. Het vallen van materie in een zwart gat is van een andere aard dan alledaagse vormen van onomkeerbaarheid zoals diffusie: waar diffusie ervoor zorgt dat een hoeveelheid van iets steeds meer uitgesmeerd wordt over

de ruimte, klontert massa juist samen wanneer het in een zwart gat valt.

De Einsteinvergelijkingen zijn dus omkeerbaar, maar hoe zit het met de Schrödingervergelijking, de vergelijking voor een quantummechanische golffunctie? Dit is die Schrödingervergelijking:

$$\large i \hbar \frac{\partial}{\partial t} \psi = \left(-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V \right) \psi$$.

De bovengenoemde vuistregel waarbij je tijdsafgeleides aan beide kanten van een vergelijking telt om te bepalen of de vergelijking omkeerbare oplossingen geeft, lijkt te suggereren dat dit hier niet het geval is. Echter, de aanwezigheid van het imaginaire getal *i* zorgt ervoor dat de evolutie van de golffunctie alsnog omkeerbaar is. Toch keert onomkeerbaarheid via een achterdeur terug. Volgens de zogeheten Kopenhaagse interpretatie van de quantummechanica is de golffunctie namelijk niet direct meetbaar, maar geeft zij slechts de kansen op de mogelijke uitkomsten van een meting. Zodra zo'n meting plaatsvindt, wordt niet langer de omkeerbare Schrödingervergelijking gevolgd, maar *stort* de golffunctie *in* tot één bepaalde uitkomst. Dat instorten is een onomkeerbaar proces, en dus is onomkeerbaarheid met de Schrödingervergelijking niet uit de quantummechanica verdreven, maar naar het meetproces verplaatst. Het probleem dat daaruit voortkomt, en dat inmiddels zijn honderdste verjaardag nadert, staat bekend als het meetprobleem: het is niet objectief vast te stellen wat precies als een meting telt, en dus ook niet waar deze onomkeerbaarheid werkelijk begint.

Tot slot

Ik hoop dat ik je met deze wandeling langs de geschiedenis van de natuurkunde ervan heb kunnen overtuigen dat het probleem van de pijl van de tijd in vrijwel ieder groot natuurkundig vraagstuk opnieuw de kop op stak, al werd dat meestal pas zichtbaar nadat de beslissende doorbraken al hadden plaatsgevonden. Hoewel we ook in de 21e eeuw ongetwijfeld nog veel over onomkeerbaarheid zullen leren, vermoed ik dat de pijl van de tijd zich nooit volledig in onze greep zal laten krijgen.

---

*Bronvermelding**:** Voor de passages over de pre- en postsocratische Grieken heb ik*

gebruikgemaakt van Carl Sagans Cosmos, Bertrand Russells Geschiedenis van de westerse filosofie en Ilja Leonard Pfeijffers Alkibiades. Voor de economische en culturele ontwikkelingen rond de veertiende eeuw en de renaissance heb ik mij gebaseerd op Peter Frankopans De zijderoutes en Stephen Greenblatts The Swerve. Voor de wrijvingswet van Newton heb ik Boek II, Sectie I van de Engelse vertaling van de Principia geraadpleegd. Voor Kepler, Newton en Euler steunde ik op Alberto Rojo en Anthony Blochs The Principle of Least Action: History and Physics en opnieuw Sagans Cosmos. Voor Boltzmann heb ik gebruikgemaakt van Carlo Cercignani's biografie Ludwig Boltzmann: The Man Who Trusted Atoms. Voor zwarte gaten, onomkeerbaarheid en het meetprobleem heb ik gebruikgemaakt van Roger Penrose' The Emperor's New Mind.