

door Bruno van Wayenburg

Gouden Lorentzmedaille voor prof. dr. Leo Kadanoff:

Kritische punten en besluiteloze systemen

Het duurde maanden, zelfs jaren voordat Leo Kadanoff zelf precies doorhad wat hij nou eigenlijk bedacht had over fase-overgangen, het van de ene in de andere staat overgaan van stoffen. Dat blijkt in wezen steeds volgens dezelfde wetten te gebeuren. Een inzicht dat te gebruiken is bij zulke uiteenlopende zaken als turbulentieonderzoek, hartritmestoornissen en fluctuaties in beurskoersen. Na een uitstapje naar de planologie houdt de net gelauwerde winnaar van de Lorentzmedaille zich onder meer bezig met paddenstoelvormige wervelingen, die je zowel boven een hete asfaltweg als na een atoombomexplosie kunt zien.

Kritische reflectie lijkt nooit ver weg bij Leo Kadanoff. Op de interviewafspraak verschijnt de natuurkundige met het boek *The Trouble with Physics* van Lee Smolin onder zijn arm. Het is een felle aanval op de snarentheorie, de belangrijkste kandidaat voor een 'Theory of Everything', een vereniging van de fundamentele natuurkrachten in één natuurkundig plaatje. Volgens Smolin is de snarentheorie te veel de enige kandidaat geworden, die weinig zicht biedt op het doen van toetsbare voorspellingen, en waaraan je als jonge natuurkundige wel mee móet doen als je nog verder wilt met je carrière. Onder natuurkundigen is het boek met gemengde gevoelens ontvangen, maar Kadanoff vindt die vijandige reactie overdreven. 'Smolin zegt heel zinnige dingen over de snarentheorie. Dat is een belangrijke theorie die sterk publiek zichtbaar is, en die moet dus ook wel wat kritiek kunnen hebben.'

Hoewel zijn eigen terrein een heel ander is, typeert die houding Kadanoff, een bedachtzaam, soms bijna stamelend formulerende Amerikaan, die af en toe scherp uit de hoek kan komen. De aanstaande president van de natuurkundigensociëteit 'American Physical Society' liet zich bijvoorbeeld ook zeer kritisch uit over de wetenschappelijkefraudeschandalen rond Jan Hendrik Schön, de jonge carrière natuurkundige die handenvol spectaculaire publicaties bij elkaar loog. In 2002 kwam dat uit. Niet alleen Schön zelf, maar ook de kritiekloze houding

in zijn werkomgeving was debet aan het schandaal, vindt Kadanoff. Zeker in deze tijden, waarin politici en publiek wetenschappers lijken te wantrouwen, moeten onderzoekers onberispelijk omgaan met de waarheid, stelde de natuurkundige. Maar ook is Kadanoff kritisch over politici en bedrijfsleven die wetenschappers moedwillig proberen te beïnvloeden, of wetenschap alleen zien als middel voor economische vooruitgang, niet als methode om 'ware dingen' te ontdekken.

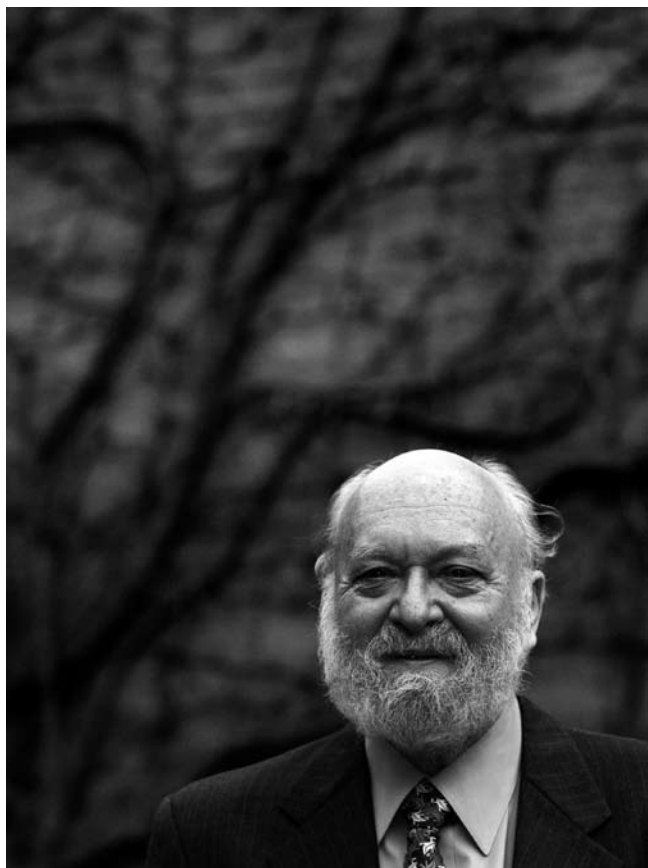
Eén enkel watermolecuul kan niet koken

Afgelopen 27 november ontving Kadanoff de gouden Lorentzmedaille van de KNAW, die sinds 1927 elke vier jaar wordt uitgereikt aan natuurkundigen die belangrijke bijdragen hebben geleverd aan hun vakgebied. Eerder ging hij onder anderen naar de Nobelprijswinnaars Max Planck, Wolfgang Pauli en Gerard 't Hooft. Kadanoffs bijdragen liggen op het terrein van de statistische fysica, een voor de buitenwereld relatief onderbelichte tak van de natuurkunde die zich bezighoudt met systemen van grote aantallen deeltjes, zoals de triljarden atomen of moleculen in vaste stoffen, vloeistoffen en gassen.

De natuurwetten die enkele atomen of moleculen beschrijven, zijn tot in detail bekend, maar het exact beschrijven en voorspellen van het gedrag van meer dan twee deeltjes is vaak al wiskundig onmogelijk, laat staan dat miljarden deeltjes zich laten vatten in een nette formule. Daarom moeten natuurkundigen hun toevlucht nemen tot gemiddelden en andere statistische methoden, vandaar de term ‘statistische fysica’.

In het hart van dit uit de late negentiende eeuw daterende vakgebied liggen ‘collectieve verschijnselen’, verschijnselen die meer zijn dan de som der delen. Zo besluiten watermoleculen in een fluitende theeketel bij 100 graden Celsius om collectief aan hun onderlinge aantrekkingskracht te ontsnappen, en te veranderen in een gas, waarin de moleculen zo goed als vrij rondbewegen.

Terwijl ónder die temperatuur ook wel watermoleculen aan de vloeistof kunnen ontsnappen, is de overgang bij 100 graden absoluut en universeel: overal in het water vormen zich bellen stoom, en de temperatuur komt pas voorbij de 100 graden als alle water verdampt is. De collectieve aard van deze ‘fase-overgang’ zit hem in de interacties tussen heel veel watermoleculen: één enkel watermolecuul kan niet koken.



Leo Kadanoff (foto Capital Photos)

Fase-overgangen duiken overal op: niet alleen het koken van water is een fase-overgang, maar ook het bevriezen van vloeistoffen, het verschijnen van magnetisatie in afkoelende metalen, en het optreden van supergeleiding – elektrische geleiding zonder weerstand – in sommige zeer koude materialen. Zelfs niet-natuurkundige collectieve verschijnselen zoals het ontstaan van files bleken te beschrijven in termen van fase-overgangen. De fase-overgang is voor de natuurkunde wat de evolutietheorie voor de biologie is: een krachtig verklarend principe met een ongekeerde reikwijdte.

Ik had eigenlijk niet eens tijd om dingen vreemd te vinden

Kadanoffs bijdrage, gedaan in de jaren zestig en zeventig, was om die universaliteit heel exact te maken door haar te vangen in een abstract, maar relatief eenvoudig idee: schaalinvariantie. Het draait daarbij om de ‘kritische temperatuur’. Neem een magnetisch materiaal als ijzer, waarvan de atomen stuk voor stuk werken als een minimagneetje: dat kan naar boven gericht zijn, of naar beneden. De magneetjes trekken daarnaast ook aan elkaar: wisselwerkingen tussen de minimagneetjes bevorderen dat naburige minimagneetjes dezelfde kant op wijzen. De ‘ideale’ toestand van het materiaal is er daarom een waarin alle minimagneetjes dezelfde kant op wijzen, en collectief één grote magneet vormen: het ijzer is dan helemaal gemagnetiseerd.

Maar aan de andere werkt warmte in het systeem verstorend op die orde: warmte laat minimagneetjes voortdurend omklappen. Is de temperatuur te hoog, dan komt het nooit van één gezamenlijke richting, en is het ijzer dus niet gemagnetiseerd.

De kritische temperatuur is precies de temperatuur waar de magnetische orde de warmtewanorde overwint. Bij het afkoelen vormen zich gebiedjes, ‘domeinen’, van eensgezinde minimagneetjes in een of juist de andere richting. Bij het naderen van de kritische temperatuur worden de grootste domeinen steeds groter, tot ze het hele materiaal omvatten. ‘Bij de kritische temperatuur hebben de domeinen echt alle mogelijke verschillende afmetingen’, zegt Kadanoff. ‘Het systeem is als het ware op het toppunt van besluiteloosheid over de toestand waarin het wil zijn.’

Juist deze toestand zonder karakteristieke schaal karakteriseert het kritisch punt, begreep de natuurkundige.

Kadanoff: 'Dat betekent dat het systeem, als je het onder een microscoop zou bekijken, er altijd hetzelfde uitziet, op welke vergroting je het ook bekijkt. Het is 'schaalinvariant'.'

Kadanoff kwam op dit idee door het onderzoeken van een theoretische modelmagneet, bekend als het Ising-model. Dat is een beschrijving van ideale, magnetische atomen die elkaar volgens een simpele wiskundige formule beïnvloeden. Eerder onderzoek aan de hand van dat model had al veel inzicht in fase-overgangen opgeleverd. Kadanoff besloot tot een theoretische uitzoomactie door in het Ising-model niet één modelatoom te bekijken, maar blokjes van vier naburige atomen tegelijk. Kadanoff: 'Je kunt dat "superatomen" noemen, en je afvragen wat de interacties van superatomen onderling zijn. Net als gewone atomen willen superatomen elkaars magnetische richting namelijk ook beïnvloeden, en deze interactie lijkt behoorlijk op die tussen enkele atomen. Alleen zijn de precieze parameters van de wisselwerking er een beetje anders.'

Supersuperatomen

Ook superatomen kun je weer in blokjes samen nemen, 'supersuperatomen', waartussen de interactie weer iets anders uitvalt. Deze stapsgewijze theoretische vergrotingsactie, consequent volgehouden, leidde Kadanoff bijna vanzelf naar schaalinvariantie: bij het kritisch punt gedragen de domeinen van de atomen zich net als die van de superatomen, en net als de supersuperatomen. Op iedere uitzoomschaal ziet het systeem er hetzelfde uit. 'Ik was niet de enige die aan deze ideeën werkte', zegt Kadanoff, 'anderen werkten vanuit andere invalshoeken aan dezelfde verschijnselen, en dat alles leidde tot een soort revolutie in het begrip van deze systemen.'

Leo Kadanoff (1937) studeerde in Harvard, en werkte als postdoc aan het Bohr Instituut in Kopenhagen. Zijn werk aan fase-overgangen deed hij aan de universiteit van Illinois. Daarna werd hij in 1969 hoogleraar aan Brown University in Rhode Island, waar hij zich bezighield met planologische vraagstukken. Vanaf 1975 werkte hij weer als natuurkundige, aan de University of Chicago. Hij is de *president elect* van de 'American Physical Society', en sterk betrokken bij wetenschapspopularisatie en de maatschappelijke rol van wetenschap.



Kadanoff deed recentelijk ook onderzoek naar druppelvorming

Schaalinvariantie bleek te leiden tot een volledige theorie waarin de eigenschappen rond het kritisch punt, zoals magnetisatie, temperatuur, warmtecapaciteit en de afmetingen van de domeinen, heel precies beschreven konden worden. Opmerkelijk was ook dat de precieze details van het systeem zelf er weinig toe deden. Die universaliteit betekent dat precies dezelfde beschrijving ook gold voor heel andere fase-overgangen: van-vloeibaar-naar-gasovergangen bleken wezenlijk hetzelfde als magnetische overgangen of fase-overgangen in polymeren of plastics, niet alleen bij wijze van metafoor, maar tot ver achter de komma precies. 'Er gold gewoon een simpele omrekenfactor tussen meetwaarden', zegt Kadanoff, die na zijn ontdekking de theorie op zoveel mogelijk experimenteel bekende fase-overgangen toepaste. Fase-overgangen bleken in te delen in een beperkt aantal 'universaliteitsklassen'. 'Het leverde een nieuwe blik op heel verschillende systemen, in hetzelfde stramien en in heel rijk detail', zegt Kadanoff.

Vreemd vond hij deze verregaande gelijkschakeling tussen totaal verschillende fysische systemen niet eens, herinnert hij zich. 'Ik was al heel lang bezig met deze ideeën, maar het was in een week rond Kerstmis dat ik me realiseerde hoe ik alles bij elkaar kon voegen. Toen ging het heel snel, het was een heel opmerkelijke ervaring, heel opwindend. Ik had eigenlijk niet eens tijd om dingen vreemd te vinden. Het duurde ook nog maanden tot jaren voor ik überhaupt de volle implicaties helemaal doorhad.'

Inmiddels zijn schaalinvariantie en universaliteitsklassen natuurkundige *mainstream* geworden, en van invloed gebleken op onderzoek van de elementaire deeltjesfysica tot turbulentieonderzoek, van hartritmestorissen tot fluctuaties in beurskoersen. Kadanoffs collega Kenneth Wilson werkte de ideeën uit tot een complete theorie, *renormalisatiegroeptheorie*, die inmiddels tot het basisinstrumentarium van de theoretische natuurkunde hoort. Tot verbazing van velen, onder anderen Wilson zelf, kreeg alleen hij daarvoor in 1982 de Nobelprijs, en

In een week rond Kerstmis realiseerde ik me hoe ik alles bij elkaar kon voegen

Kadanoff niet. ‘Wilson heeft belangrijke ideeën toegevoegd, en eerdere ideeën, die nog vrij onsamenhangend waren, samengevoegd tot één geheel’, zegt Kadanoff vergoelijkend, ‘en die ideeën waren niet alleen afkomstig van mij, maar ook van andere Amerikanen en Russen, terwijl de Nobelprijs maar naar maximaal vier mensen kan gaan. Daarom denk ik dat het Nobelcomité een moeilijke, maar goede beslissing heeft genomen. Ik kan er in ieder geval geen moment wrokkig om zijn.’

‘Na die doorbraak wist ik even niet wat ik nou zou moeten doen’, vertelt Kadanoff. Terwijl het natuurkundig denken even vastzat, besloot de theoreticus zich te storten op een heel ander gebied: stadsplanning. ‘Het was de tijd dat sociale toepassingen van wetenschap in de mode kwamen, en ook was er toen bij de overheid een grote belang-

stelling voor commentaar van burgers.’ Kadanoff werkte bij de *planning board* van de kleine staat Rhode Island. ‘Ik was vooral geïnteresseerd in het gebruik dat planologen toen maakten van computermodellen die tot de conclusie voerden dat de sloop van goedkope woningen tot betere economische omstandigheden zou leiden.’

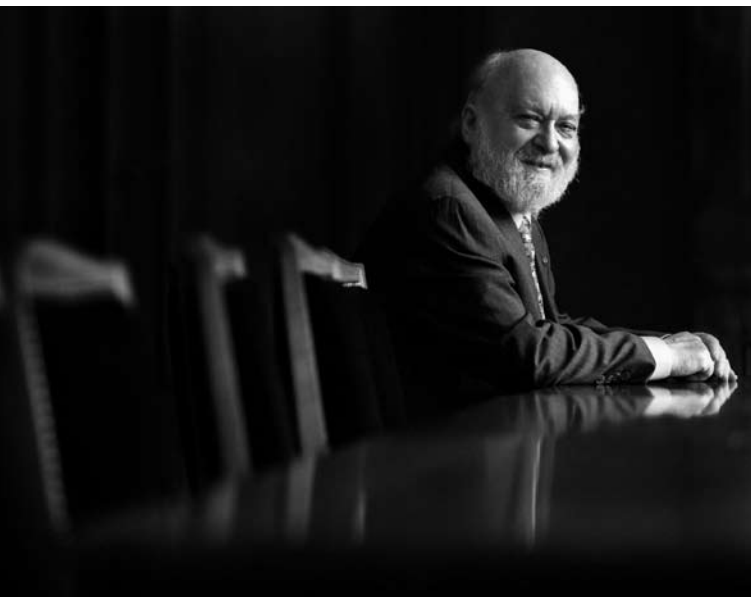
‘Computermodellen waren nieuw, en het besef was nog niet echt doorgedrongen dat wat je ervan leert sterk afhankelijk is van de aannames die je erin stop’, zegt Kadanoff, die probeerde precies de tegenovergestelde conclusies te bereiken met dezelfde modellen nadat hij ze een heel klein beetje had aangepast. ‘Ik heb toen wel wat natuurkunde gemist, maar ik heb veel geleerd over computermodellen, dat ik nu ook weer gebruik. Een groot deel van mijn tijd besteed ik aan het bekritisieren van het gebruik van computermodellen. Natuurkunde bedrijf ik ook voornamelijk per computer.’

Eenvoudige ingrediënten

Na het planologie-intermezzo stortte Kadanoff zich eind jaren zeventig op het toen opbloeiende chaosonderzoek, in zijn huidige incarnatie bekend als ‘complexe systemen’: systemen waarin – eigenlijk net als bij fase-overgangen – eenvoudige ingrediënten en basiswetten tot ingewikkelde, complex gestructureerde uitkomsten kunnen leiden, met een hoge mate van onvoorspelbaarheid. Een typisch voorbeeld is onderzoek naar stromingen in vloeistoffen, een probleem waarvan de basiswetten in drie regels wiskunde op te schrijven zijn, maar waarvan de uitkomsten snel ingewikkeld en onvoorspelbaar worden.

‘Je moet op zoek naar algemene verschijnselen’, zegt Kadanoff, die veel onderzoek besteedde aan “plumes”, paddenstoelvormige wervelingen die op allerlei schalen opduiken in vloeistoffen en gassen, van de wervelingen boven een hete asfaltweg tot de paddenstoelwolken van atoombomexplosies. ‘Ons werk is vervolgens om te beschrijven hoe *plumes* zich samenvoegen tot nieuwe, overkoepelende patronen.’

De vorderingen daarin zijn tot nog toe interessant, maar ook moeizaam en soms verraderlijk gebleken. Of er voor complexe systemen ooit een theorie zal verschijnen met de kracht van renormalisatiegroeptheorie, durft Kadanoff niet te voorspellen. ‘De “wetten” die uit ons onderzoek komen, zullen niet de harde, universele voorspellende waarde hebben van Newtons wetten. Het zullen eerder principes zijn, algemene tendensen’, vermoedt Kadanoff, ‘Maar goed, je moet ieder probleem toch te lijf gaan met de instrumenten waar je over beschikt. En het belangrijkste is: we zullen complexiteit er beter mee begrijpen.’



Leo Kadanoff (foto Capital Photos)