

### **Is de toekomst voorspelbaar?**

In de negentiende eeuw dacht men dat dit in principe mogelijk moest zijn. Pierre-Simon Laplace redeneerde als volgt. Volgens de wetten van de Newtoniaanse mechanica is de beweging van een lichaam te berekenen als je weet welke krachten er op werken en je tevens de beginpositie en beginsnelheid kent. Stel nu dat je op een willekeurig gekozen moment in de tijd de posities en snelheden van alle deeltjes in het universum zou kennen en je wist bovendien alle onderlinge krachten. Dan zou je door consequent Newton's wetten toe te passen de toestand van het universum op ieder tijdstip in de toekomst (maar ook in het verleden) exact kunnen uitrekenen. Dat dit praktisch niet uitvoerbaar is vond Laplace niet zo belangrijk. Waar het hem om ging was te laten zien dat de toekomst *in principe* voorspelbaar is. Zo'n wereldbeeld noemen we deterministisch.

### **Is het universum dus eigenlijk een groot Zwitsers precisie-uurwerk?**

Laplace zou deze vraag met ja beantwoord hebben. Een kleine eeuw later is Jules Henri Poincaré hier eens goed aan gaan rekenen. Hij pakte het bescheiden aan door de mechanica van een 'universum' bestaande uit slechts drie deeltjes te analyseren. Hij liet zien dat heel kleine verschillen in de begintoestand leiden tot heel grote verschillen op latere tijdstippen. Omdat je de begintoestand nooit exact kunt meten concludeerde hij hieruit dat het zelfs voor dit sterk vereenvoudigde universum wezenlijk onmogelijk is de toekomst te voorspellen. Dit visionaire inzicht maakte hij wereldkundig in 1903 in een essay 'Wetenschap en Methode', lang voor de stormachtige ontwikkeling van de chaostheorie aan het einde van de twintigste eeuw!

### **Zou de toekomst voorspelbaar zijn mits je maar oneindig nauwkeurig kon meten?**

Helaas gaat ook dit niet op. Met de komst van de quantummechanica aan het begin van de twintigste eeuw werd definitief afgerekend met het deterministische wereldbeeld van Laplace. Volgens Heisenberg's onzekerheidsprincipe zijn positie en snelheid van een deeltje principieel niet tegelijkertijd met oneindige nauwkeurigheid te bepalen. Hoe nauwkeuriger de meting van de positie, hoe minder nauwkeurig de snelheid te bepalen valt. En omgekeerd, als je de snelheid oneindig nauwkeurig meet kun je niets meer zeggen over de positie. Dit effect is universeel, maar speelt alleen een rol van betekenis op zeer kleine schaal. Omdat we gewend zijn de wereld volgens 'de menselijke maat' te observeren, merken we er in het dagelijks leven helemaal niets van. Op atomaire schaal is Heisenberg's onzekerheidsprincipe echter allesbepalend. Eén ding is zeker: de toekomst is niet voorspelbaar.

### **Van orde naar chaos.**

Laten we de wereldbeelden nog eens op een rijtje zetten aan de hand van een analogie. Stel, een voetballer schiet een bal in een dicht oerwoud. De bal raakt een boom, verandert van richting, raakt een volgende boom, en zo verder. Volgens het wereldbeeld van Laplace kun je de baan van de voetbal exact voorspellen als je weet waar de voetballer zich bevindt, in welke richting hij schiet en waar de bomen precies staan. Schiet hij een tweede keer in dezelfde richting vanaf dezelfde plaats, dan volgt de bal exact hetzelfde pad door het oerwoud. Volgens Poincaré is dit praktisch onhaalbaar. Als de voetballer de tweede keer vanaf bijna precies dezelfde plaats in bijna exact dezelfde richting schiet, dan volgt de bal al na een paar bomen een compleet ander pad. Volgens Heisenberg zou je over een voetbal op atomaire schaal alleen maar iets over de waarschijnlijkheid van ieder denkbaar pad kunnen zeggen. We zien dus een ontwikkeling van orde naar chaos.

### **Van chaos naar orde.**

In de geofysica wordt sinds het begin van de éérentwintigste eeuw aan een nieuwe methode gewerkt om ruis om te zetten in signaal. Ruis is altijd gezien als iets wat je liever kwijt dan rijk bent. Op grijsgedraaide grammofonplaten (wie kent ze nog) kan de ruis het oorspronkelijke muzieksignaal onaangenaam overstemmen. Er bestaan tegenwoordig geavanceerde technieken om ruis te onderdrukken en de muziek als het ware weer achter de ruis vandaan te halen. Maar in de huidige ontwikkelingen in de geofysica gaat het om iets wezenlijk anders. Hier wordt natuurlijke achtergrondruis niet onderdrukt, maar juist zelf omgezet in signaal. Om een voorbeeld te geven: de ruis van de branding op de kust van zuid-Californië is opgenomen met seismometers op het vaste land, omgezet in seismisch signaal en vervolgens gebruikt om een afbeelding te maken van de structuur van de aardkorst onder zuid-Californië. Hier zien we dus orde uit chaos ontstaan! Is hier sprake van een paradox?

Referentie: Shapiro et al., *Science*, Vol. 307, p 1615-1618 (2005)

### **Akoestische beeldvorming zonder bron.**

Om te illustreren wat er in de geofysica aan de hand is gaan we weer terug naar de oerwoud-analogie. We vervangen de voetballer door een scheidsrechter die op haar fluit blaast. Het fluitsignaal plant zich door het oerwoud voort en wordt door de vele bomen weerkaatst. Met microfoons vangen we het fluitsignaal op en dit gebruiken we voor akoestische beeldvorming van het oerwoud. We kunnen dit echter ook zonder fluitende scheidsrechter! Stel dat het regent in het oerwoud, waarbij de regendruppels een continue ruis veroorzaken, die met de microfoons wordt opgenomen. We plaatsen nu één extra microfoon op de plaats waar zich oorspronkelijk de scheidsrechter bevond. Volgens de nieuwe geofysische theorie kunnen we de ruisregistraties nu zodanig bewerken dat het is alsof op de plaats van deze microfoon een geluidsbron stond. M.a.w., uit de ruisregistraties construeren we een virtuele scheidsrechter die een fluitsignaal geeft. Zo kunnen we dus akoestische beeldvorming toepassen zonder actieve bron!

Referentie: Draganov et al., *Geophysical Research Letters*, Vol. 34, L04305 (2007)

## **De uitweg uit de paradox.**

Hoewel het op zich al verbazingwekkend is dat we ruis in signaal kunnen omzetten, blijkt het in de praktijk ook nog eens behoorlijk robuust te werken. Voor de verklaring gaan we nog één keer terug naar het oerwoud. Als de scheidsrechter meerdere keren fluit, steeds op een iets andere positie, dan verandert het geluidspad niet noemenswaardig.

Akoestische golven gedragen zich in het oerwoud dus veel stabielier dan de voetbal.

Tijdens de regenbui laten de bomen een ‘akoestische vingerafdruk’ achter op het chaotische signaal van de regendruppels. Het is te danken aan het stabiele gedrag van golven dat deze vingerafdruk kan worden ontrafeld. Chaos sluit determinisme dus niet uit maar kan juist gebruikt worden om informatie te verkrijgen over de deterministische eigenschappen van de fysische wereld, of dit nu een oerwoud is of het inwendige van de aarde. Dit inzicht helpt ons weliswaar niet om de toekomst te voorspellen, maar wel om nieuwe olievelden te vinden. En zo hebben we toch nog een bescheiden invloed op de toekomst!

Referentie: Wapenaar and Snieder, Chaos tamed. Nature (2007)