

Inhoud

In een vlucht spreuwen	9
Fysica in Rome, vijftig jaar geleden	26
Faseovergangen, oftewel collectieve verschijnselen	41
Spinglazen: de introductie van wanorde	56
Uitwisseling van metaforen tussen metafysica en biologie	79
Hoe ideeën ontstaan	94
De zin van de wetenschap	108
Je ne regrette rien	116
<i>Verantwoording</i>	125

In een vlucht spreuwen

De kwestie van de interacties is belangrijk, ook om psychologische, sociale en economische verschijnselen te begrijpen. We concentreren ons in het bijzonder op de vraag hoe iedere component van de vlucht op coherente wijze kan bewegen en een unieke collectieve, meervoudige entiteit produceert.

Het is fascinerend om het collectieve gedrag van dieren te observeren, of het nu vogels, scholen vissen of kuddes zoogdieren zijn.

Bij zonsondergang zien we vluchten vogels fantastische figuren produceren, bestaande uit duizenden dansende zwarte vlekjes, die zich aftekenen tegen een hemel met veranderende kleuren. We zien dat ze allemaal samen bewegen zonder op elkaar te botsen, maar zich ook niet verspreiden, dat ze obstakels overwinnen, afstand van elkaar nemen en dan weer samenkomen, en voortdurend hun rangschikking in de ruimte veranderen, alsof een orkest-dirigent aanwijzingen geeft die ze allemaal tegelijk uitvoeren. We kunnen daar uren naar blijven kijken, omdat het schouwspel steeds andere, onvoorziene vormen oplevert. Soms breekt ook bij deze pure schoonheid even de beroepsdeformatie van een wetenschapper door en komen er veel vragen in ons hoofd op. Bestaat er een orkest-dirigent of is het collectieve gedrag zelfgeorganiseerd? Hoe kan informatie zich

snel door de hele massa verspreiden? Hoe is het mogelijk dat de configuraties zo snel veranderen? Hoe zijn de snelheden en versnellingen van de vogels verdeeld? Hoe kunnen ze samen wenden en keren zonder op elkaar te botsen? Zijn eenvoudige interactieregels tussen de spreuwen voldoende om de vloeiende en variabele collectieve bewegingen te genereren die we in Rome aan de hemel zien?

Wie nieuwsgierig is en het antwoord op zijn vragen wilt weten begint te zoeken: vroeger in boeken, nu op het internet. Als je geluk hebt, vind je antwoorden, maar als er geen antwoorden zijn, omdat niemand ze kent, begin je je, als je écht nieuwsgierig bent, af te vragen of jij zelf die antwoorden niet zou moeten vinden. Het feit dat niemand het antwoord gevonden heeft, schrikt je niet af, want uiteindelijk is dat je beroep: datgene bedenken of doen wat nog nooit iemand bedacht of gedaan heeft. Toch kun je je leven niet doorbrengen met proberen gepantserde deuren te openen waarvan je de sleutel niet hebt. Voordat je vertrekt moet je weten of je de competentie en de technische instrumenten bezit die het je mogelijk maken de zaken tot op de bodem uit te zoeken. Niemand kan je succes garanderen, je moet je tot het uiterste inspinnen en als je dan toch tegen te grote obstakels ploopt, is het beter om ervan af te zien.

Complex collectief gedrag

De vlucht van spreuwen fascineerde mij bijzonder, omdat die niet alleen verbonden was met de rode draad van mijn onderzoek, maar met zeer veel andere studies in het moderne fysische onderzoek: het begrijpen van het gedrag van een uit een groot aantal interagerende componenten (actoren) bestaand systeem. In de fysica kunnen de actoren in voorkomende gevallen elektronen, atomen, spins of

moleculen zijn. Die hebben heel eenvoudige gedragsregels, maar allemaal samen vertonen ze een veel complexer gedrag. De statistische fysica probeert sinds de negentiende eeuw de volgende soort vragen te beantwoorden: waarom kookt een vloeistof bij een bepaalde temperatuur, of bevriest ze, waarom geleiden bepaalde stoffen (bijvoorbeeld metalen) elektrische stroom en geven ze warmte goed door, terwijl andere stoffen isolatoren zijn... Het antwoord op deze vragen is al een tijd geleden gevonden, maar naar andere antwoorden zijn we nog steeds op zoek.

Bij al dat soort fysische problemen slagen we erin om op kwantitatieve wijze te begrijpen hoe het collectieve gedrag ontstaat, uitgaande van eenvoudige interactieregels tussen de individuele actoren. Het was een uitdaging om de toepasbaarheid van de technieken van de statistische mechanica van levenloze entiteiten uit te breiden tot dieren, zoals bijvoorbeeld spreeuwen. De resultaten zouden niet alleen voor de ethologie en de evolutiebiologie interessant zijn, maar konden op een veel langere tijdschaal leiden tot een beter begrip van economische en sociale verschijnselen in de menswetenschappen. Ook in dat geval hebben we te maken met een groot aantal individuen die elkaar wederzijds beïnvloeden. We willen begrijpen welk verband er bestaat tussen het gedrag van afzonderlijke individuen en collectief gedrag.

De grote Amerikaanse fysicus Philip Warren Anderson (Nobelprijs 1977) heeft dat idee uiteengezet in een provocerend artikel, getiteld 'More is Different'. Daarin beweert hij dat de toename van het aantal componenten van een systeem niet alleen een kwantitatieve maar ook een kwalitatieve verandering teweegbrengt: het voornaamste conceptuele probleem dat de fysica zou moeten aanpakken is het doorgronden van de relaties tussen microscopische regels en macroscopisch gedrag.

Vluchten spreeuwen

Om iets te verklaren, moeten we het eerst leren kennen. In dit geval ontbrak het ons aan cruciale informatie: we moesten de bewegingen van spreeuwen in de ruimte begrijpen, maar die informatie was destijds niet beschikbaar. De enorme hoeveelheid video-opnamen en foto's van vluchten die ter beschikking stonden (je vindt ze gemakkelijk, ook op het internet) waren alle vanuit één camerastandpunt gemaakt en bevatten dus geen enkele driedimensionale informatie. We leken een beetje op de gevangenen in Plato's mythe van de grot, die, omdat ze alleen de op de wand van de grot geprojecteerde tweedimensionale schaduwen zagen, de driedimensionaliteit van objecten niet konden begrijpen.

Juist die moeilijkheid was een andere motivatie voor mijn belangstelling: de studie van de beweging van spreeuwen was een compleet project. Het omvatte de opzet van het experiment, het verzamelen en de analyse van de data, de interpretatie van de experimentele resultaten om daaruit conclusies te kunnen trekken.

We wisten dat de methoden van de statistische fysica, van oudsher mijn onderzoeksterrein, onmisbaar zouden zijn voor de driedimensionale reconstructie van de vluchtbanen van de spreeuwen, maar wat mij werkelijk aantrok was mijn betrokkenheid bij de planning en verwezenlijking van het experimentele gedeelte. Wij theoretische fysici staan in het algemeen ver van de laboratoria af en we werken met abstracte begrippen. Een reëel probleem oplossen wil zeggan dat je zeer veel variabelen onder controle moet houden, in dit geval van de resolutie van de brandpuntsafstanden van de cameralenzen tot de optimale opstelling van de apparatuur, van de opslagcapaciteit van de data tot

de analysetechnieken. Ieder detail bepaalt of het experiment wel of niet slaagt. Wanneer je 'aan de keukentafel' zit te redeneren, heb je er geen flauw idee van hoeveel problemen je 'in het veld' tegenkomt. Te ver van de laboratoria af staan is mij nooit bevallen.

Spreeuwen zijn uiterst interessante dieren. Eeuwenlang leefden ze in de warme maanden in Noord-Europa en overwinterden ze in Noord-Afrika. Tegenwoordig zijn niet alleen de wintertemperaturen gestegen ten gevolge van de globale opwarming van de aarde, maar ook onze steden zijn veel warmer geworden, zowel door hun groei, als door de aanwezigheid van vele soorten warmtebronnen (huisverwarming, verkeer). Veel spreeuwen steken niet langer de Middellandse Zee over, maar blijven in verschillende Italiaanse kuststeden overwinteren, onder meer in Rome, waar de winters zachter zijn dan vroeger.

De spreeuwen komen hier begin november en vertrekken begin maart. Ze zijn tamelijk punctueel wat die bewegingen betreft: waarschijnlijk hangt het moment van hun trek niet zozeer van de temperatuur af, als wel van sterrenkundige factoren, zoals het aantal uren daglicht. In Rome vinden ze 's nachts groenblijvende bomen die beschutting bieden tegen de wind; overdag wordt het voedsel in de stad schaars en verplaatsen ze zich in kleine groepen van ongeveer honderd vogels naar de velden buiten de ringweg. Het zijn sociale dieren, gewend om in groepen te leven. Wanneer ze zich naar een veld verplaatsen, gaat de ene helft rustig eten, terwijl de andere helft aan de zijkant blijft om de omgeving af te speuren naar de mogelijke komst van een roofdier. Als ze daarna bij het volgende veld komen, worden de rollen omgekeerd. 's Avonds keren ze terug naar de warmte van de stad en voordat ze in de bomen gaan rusten, vormen ze enorme, in de lucht boven de hoofdstad

rondcirkelende zwermen. Ondanks alles zijn het toch nog dieren die gevoelig zijn voor winterse kou: na de nachten waarin er een krachtige, ijzige noordenwind waait, kun je zonder moeite veel morsdode spreeuwen vinden onder de bomen die onvoldoende bescherming hadden geboden.

Een goed gekozen slaappleaats is dus een kwestie van leven of dood. Het is zeer waarschijnlijk dat die luchtchooreografieën in de avond een – ook van verre zichtbaar – signaal zijn dat er een geschikte slaappleaats is om de nacht door te brengen. Het is als het zwaaien met een immense, zeer opvallende seinvlag. Zelf heb ik bij een heldere winterschemering met het blote oog de bewegingen van vluchten spreeuwen op ongeveer tien kilometer afstand kunnen zien. Het waren grijsachtige vlekjes die zich bijna als amoeben voortbewogen tegen de achtergrond van een hemel waarin nog een dunne oplichtende streep vlak boven de horizon te zien was. De eerste kleine groepen die van de velden komen, beginnen steeds gejaagder te dansen naarmate het licht vermindert. Langzaam arriveren ook de laatkomers en ten slotte vormen zich vluchten van duizenden vogels die zich een halfuur na zonsondergang, wanneer het licht bijna verdwenen is, plotseling op de bomen van de slaappleaats storten. Daar lijken ze in te verdwijnen als in een onderaardse grot.

Dikwijls verschijnt bij spreeuwen de slechtvalk op het toneel, op zoek naar zijn avondmaal. Als er niet op gelet wordt, gebeurt dat ongezien: de aandacht is op de spreeuwen geconcentreerd en de valk wordt alleen gezien door de weinigen die hem zoeken. Ondanks het feit dat de slechtvalk een roofvogel is met een spanwijdte van een meter, die in duikvlucht snelheden van meer dan 200 kilometer per uur kan bereiken, zijn spreeuwen geen gemakkelijke prooi. Een botsing in de lucht met een spreeuw zou namelijk een

breuk in de breekbare vleugels van de valk kunnen veroorzaken, wat beslist tot een dodelijk ongeluk zou leiden. De valk durft de vlucht spreeuwen dus niet binnen te dringen en probeert geïsoleerde spreeuwen aan de rand te pakken te krijgen. De spreeuwen reageren op de aanval van de valk door dichter bij elkaar te gaan vliegen, de rijen te sluiten en hun richting snel te veranderen om aan de fatale klauwen te ontkomen. Enkele van de meest spectaculaire bewegingen van spreeuwen worden veroorzaakt door hun pogingen om zich aan de herhaalde aanvallen van de slechtvalk te onttrekken. Deze moet een groot aantal aanvallen uitvoeren voordat hij een prooi vangt. Waarschijnlijk zijn veel gedragingen van spreeuwen juist te danken aan de noodzaak om die geduchte aanvallen te overleven.

Het experiment

Laten we verdergaan met ons project. De eerste moeilijkheid was het maken van een driedimensionaal beeld van de vlucht en zijn vorm, en daarvan een 3D-film te maken door meerdere opeenvolgende foto's te combineren. In theorie was het gemakkelijk en kon het probleem eenvoudig worden opgelost. We weten immers allemaal dat twee ogen volstaan om in drie dimensies te kunnen zien. Tegelijkertijd uit twee verschillende gezichtspunten kijken, ook al liggen die zo dicht bij elkaar als onze ogen, stelt de hersenen in staat om de afstand van een object te 'berekenen' en zo driedimensionale beelden te construeren. Met één oog verlies je de diepte in het beeld. Je kunt dat gemakkelijk ervaren door één oog dicht te doen en te proberen met één hand een object voor je te pakken: de hand zal het verder weg of dichterbij zoeken dan het in werkelijkheid is. En als je probeert te tennissen of te pingpongen met één oog geblinddoekt,

zul je zeker verliezen. Toch functioneert dat systeem alleen goed als we in staat zijn om de vogel in de rechtercamera te identificeren met de vogel in de linkercamera, een onderneming die een nachtmerrie kan worden als er op iedere foto duizenden vogels staan.

Het was duidelijk dat we hier voor een uitdaging stonden. In de voorhanden zijnde wetenschappelijke literatuur waren er enkele foto's in 3D gereconstrueerd met hoogstens een twintigtal met de hand geïdentificeerde dieren. Wij wilden echter meerdere duizenden foto's reconstrueren en op ieder daarvan stonden een paar duizend vogels. Dat kon natuurlijk niet met de hand worden gedaan. We moesten de identificatie aan de computer overlaten.

Een probleem te lijf gaan zonder adequate voorbereiding is vragen om moeilijkheden. We vormden een groep waarin niet alleen fysici (behalve ikzelf ook mijn leermeester Nicola Cabibbo en twee van mijn beste leerlingen, Andrea Cavagna en Irene Giardina) zaten, maar ook twee ornithologen (Enrico Alleva en Claudio Carere). Samen met de betreurde econoom Marcello de Cecco en andere Europese groepen vroegen we in 2004 financiering aan bij de Europese Gemeenschap. Het verzoek werd ingewilligd. We konden aan de slag, we konden er afstudeerders en promovendi bij betrekken en apparatuur kopen.

We plaatsten onze camera's op het dak van het Palazzo Massimo, waarin het prachtige Romeins Nationaal Museum is gevestigd. Het museum kijkt uit op het plein voor het station Roma Termini, in die jaren (de eerste data zijn tussen december 2005 en februari 2006 verzameld) door de spreeuwen uitgekozen als een van hun drukst bezochte slaappleatsen. We gebruikten commerciële camera's van de beste kwaliteit, want televisiecamera's waren nog niet scherp genoeg. Twee camera's, op een afstand van 25 meter

van elkaar opgesteld, garandeerden ons dat we de relatieve positie van twee spreeuwen op een paar honderd meter van ons vandaan konden bepalen met een ruimtelijke nauwkeurigheid van ongeveer 10 centimeter. Die nauwkeurigheid was voldoende om de spreeuwen, die op ongeveer een meter van elkaar vliegen, te onderscheiden. We hadden een derde camera op enkele meters afstand van één van de andere toegevoegd, die ons hielp wanneer het beeld van twee vogels in een van de twee camera's op elkaar kwam te liggen. Die derde camera was van fundamenteel belang bij verschillende gevallen waarin de reconstructie bijzonder moeilijk bleek.

De camera's maakten alle drie tegelijkertijd, met een nauwkeurigheid van een milliseconde (we moesten een eenvoudig elektronisch circuit bouwen om ze te besturen), vijf foto's per seconde. In werkelijkheid waren er op alle plaatsen twee camera's direct naast elkaar opgesteld, die afwisselend opnamen maakten, zodat de opnamefrequentie werd verdubbeld: in feite maakten we tien opnames per seconde. Eigenlijk waren we niet zoveel slechter dan een televisiecamera, die gewoonlijk vijftientig tot dertig beelden per seconden maakt. We gebruikten camera's, maar in werkelijkheid kregen we korte films.

Ik sla alle technische problemen – van het uitlijnen van de camera's (uitgevoerd met behulp van een strakgespannen vissnoer), het scherpstellen en de kalibratie, het snel opslaan van de grote hoeveelheid megabytes aan informatie, enzovoort – maar over. Ten slotte kregen we het voor elkaar, mede door de vasthoudendheid van Andrea Cavagna, aan wie ik de leiding van de hele operatie graag toevertrouwde. Hij is beslist een veel betere organisator dan ik, en ik werd bovendien afgeleid door veel andere taken.

Uiteraard moesten we 3D-films maken, een technisch