

GIORGIO PARISI

**UN STOL
DE GRAURI**

MINUNĂȚIILE
SISTEMELOR
COMPLEXE

BOOKZONE



Cuprins

Un stol de grauri.....	9
Fizica la Roma, acum cincizeci de ani.....	35
Tranziții de fază sau fenomenele colective.....	58
Sticle de spin: introducerea dezordinii.....	80
Schimb de metafore între fizică și biologie.....	114
Cum se nasc ideile	137
Sensul științei.....	159
<i>Je ne regrette rien</i>	172
Notă.....	185



Un stol de grauri

Interacțiunile reprezintă o temă importantă, chiar și pentru înțelegerea unor fenomene psihologice, sociale și economice. În particular, ne-am concentrat pe felul în care fiecare membru al unui stol reușește să comunice pentru a se deplasa coerent, producând o unică entitate colectivă și multiplă.

Observarea comportamentului colectiv al animalelor e fascinantă, indiferent dacă e vorba despre stoluri de păsări, bancuri de pești ori turme de mamifere.

În amurg, putem vedea stoluri de păsări desenând imagini fantasmagorice, dansul a

mii de pete negre mărunte proiectate pe un cer în culori schimbătoare. Le vedem cum se mișcă toate deodată fără să se ciocnească unele de altele, fără să se disperseze, depășind obstacole, îndepărtându-se și apoi refăcând formația, recompunând întruna așezarea lor spațială, de parc-ar urma împreună și fiecare în parte comenzile unui dirijor. Am putea să le privim la nesfârșit — spectacolul e mereu altul, în forme noi și imposibil de prezis. Uneori însă, chiar și în fața acestei frumuseți pure, deformația profesională a omului de știință se impune și naște o mulțime de întrebări care nu-i dau pace. Chiar există un dirijor sau acest comportament colectiv se autoorganizează? Cum anume se propagă rapid informația prin întregul stol? Cum e posibil să se schimbe configurațiile atât de rapid? Cum se distribuie vitezele și accelerațiile păsărilor? Cum reușesc să vireze toate deodată fără să se ciocnească? Sunt oare de ajuns niște reguli simple pentru ca interacțiunile dintre stoluri să genereze mișcări colective articulate și variabile ca acelea pe care le observăm pe cerul Romei?

Când ești curios și vrei să afli răspunsuri la întrebările pe care ți le-ai pus, începi să cauți: pe vremuri, în cărți, acum, pe internet. Dacă ai noroc, găsești răspunsurile, dar când nu există răspunsuri, pentru că nimeni nu le cunoaște, dacă ești *cu adevărat* curios, începi să te întrebi dacă n-ar fi cazul să găsești chiar tu răspunsul. Faptul că nu l-a găsit nimeni până acum nu te sperie, pentru că exact asta e meseria ta: să-ți imaginezi sau să faci ceva ce n-a mai făcut nimeni înainte. Dar nici nu-ți poți petrece viața încercând să deschizi porți blindate ale căror chei nu le ai. Înainte de a porni la drum, trebuie să te lămurești dacă ai competența și instrumentele care să-ți permită să sapi în adâncime; nimeni nu-ți poate garanta succesul; trebuie, metaforic vorbind, să-ți iei inima-n dinți, dar, dacă inima iese sfâșiată, atunci mai bine te lași păgubaș.

Comportamente colective complexe

Zborul graurilor mă fascina atât de mult, pentru că era legat nu doar de firul conducător al cercetărilor mele, ci și de multe alte preocupări ale fizicii moderne: înțelegerea

comportamentului unui sistem compus dintr-un număr mare de elemente (actori) care interacționează. În funcție de situație, în fizică, actorii pot fi electroni, atomi, spini, molecule; au reguli de comportare foarte simple, dar, luați laolaltă, dau naștere unui comportament colectiv mult mai complex. Începând din secolul al XIX-lea, fizica statistică încearcă să răspundă la întrebări de felul următor: de ce fierbe sau îngheață un lichid la o temperatură exactă, de ce anumite substanțe conduc curentul electric și transmit bine căldura (metalele, de exemplu), în timp ce altele sunt izolatoare... Răspunsurile acestor întrebări au fost găsite de mult, dar pentru altele încă se caută deslușirea misterului.

În toate aceste probleme de fizică, reușim să înțelegem din punct de vedere cantitativ cum derivă comportamentul colectiv din regulile simple ale interacțiunii dintre indivizi. Miza era extinderea aplicabilității tehnicilor de mecanică statistică de la entitățile neînsuflețite la animale, bunăoară la grauri. Rezultatele ar fi fost interesante pentru

etologie și biologie evoluționistă, dar, la o scară de timp mai largă, ar fi putut duce la o înțelegere mai profundă a fenomenelor economice și sociale în științele umaniste. Și aici avem un număr mare de indivizi care se influențează unul pe celălalt întâmplător. Trebuie înțeleasă legătura care există între comportamentul fiecărui individ luat în parte și comportamentul lor colectiv.

Marele fizician american Philip Warren Anderson (premiul Nobel, 1977) a expus această idee într-un articol provocator din 1972, intitulat *More is Different*, în care susținea că o creștere a numărului de componente ale unui sistem determină o schimbare nu doar cantitativă, ci și calitativă: problema conceptuală principală pe care ar fi urmat s-o înfrunte fizica ar fi fost înțelegerea relațiilor dintre regulile microscopice și comportamentul macroscopic.

Stoluri de grauri

Nu putem explica decât ce cunoaștem; în acest caz, ne lipsea o informație crucială: voiam să înțelegem deplasările stolurilor în

spațiu, dar informația aceasta nu era disponibilă la acel moment. Într-adevăr, cantitatea enormă de înregistrări video și fotografiile ale stolurilor care ne stă la dispoziție (la îndemână și pe internet) era făcută dintr-un singur punct de vedere, pierzând orice informație tridimensională. Ne găseam cumva în situația prizonierilor din mitul peșterii al lui Platon care, văzând numai umbre bidimensionale proiectate pe peretele peșterii, nu puteau sesiza natura tridimensională a obiectelor.

Tocmai această dificultate îmi stârnea interesul: studiul deplasării stolurilor era un proiect complet. Cuprindea imaginarea experimentului, strângerea și analiza datelor, elaborarea unor coduri informatice pentru simulări și interpretarea rezultatelor experimentale pentru a trage concluziile.

Știam că metodele fizicii statistice, domeniul meu de cercetare dintotdeauna, vor fi indispensabile pentru reconstrucția tridimensională a traseelor stolurilor, dar ce mă atrăgea era implicarea în proiectarea și realizarea părții experimentale. În general,

noi, fizicienii teoreticieni, ne ținem departe de laboratoare și lucrăm numai cu concepte abstracte. Or, a rezolva o problemă reală presupune controlul foarte multor variabile care, în cazul acesta, mergeau de la rezoluția obiectivelor aparatelor fotografice la dispunerea optimală a mașinilor, de la capacitatea de stocare a datelor la tehnicile de analiză. Fiecare detaliu influențează decisiv reușita experimentului; când facem raționamente „la masă”, nici măcar nu bănuim câte probleme apar „pe teren”. Nu mi-a plăcut niciodată să stau prea departe de laborator.

Graurii sunt păsări extrem de interesante. Cu secole în urmă, trăiau în nordul Europei în lunile calde și iernau în Africa de Nord. Acum, din cauza încălzirii globale, au crescut temperaturile invernale, iar orașele noastre au devenit mult mai calde, fie pentru că s-au tot mărit, fie din cauza prezenței a numeroase surse de căldură (încălzire domestică, trafic). Mulți grauri nu mai traversează Mediterana și rămân să petreacă iarna în orașele de coastă ale Italiei, printre care și Roma, unde iernile sunt mai blânde decât odinioară.

Graurii sosesc în primele zile ale lui noiembrie și pleacă pe la începutul lui martie. Sunt destul de punctuali în deplasările lor: probabil că momentul migrației nu depinde atât de mult de temperatură, cât, mai degrabă, de motive astronomice, ca durata orelor de lumină. La Roma, pentru înnoptat, găsesc arbori veșnic verzi care-i apără de vânt; ziua, nu prea au ce mânca în oraș, așa că formează grupuri mici, de circa o sută de indivizi, care pleacă după mâncare spre câmpurile de dincolo de centura orașului. Sunt animale sociabile, obișnuite să trăiască în grup: când poposesc pe un câmp, o jumătate dintre ele mănâncă în liniște, în timp ce cealaltă jumătate se dispune la marginile câmpului și pândește eventuala apariție a vreunui prădător; când trec la următorul câmp, rolurile se inversează. Seara se întorc în oraș, la căldură, și, înainte de a se așeza pe ramurile copacilor, formează stoluri extrem de numeroase care brăzdează cerul capitalei. Oricum, sunt încă sensibile la frigul iernatic: în diminețile de după nopțile în care se simte puternic suflul înghețat al tramontanei, îi putem găsi pe mulți dintre ei înțepenți

sub copacii care nu i-au putut apăra suficient de temperaturile scăzute.

Așadar, o bună alegere a locului de dormit devine o chestiune de viață și de moarte. E foarte probabil ca acele coregrafii aeriene vesperale să reprezinte un semnal — vizibil chiar de departe — al prezenței unui loc de dormit bun pentru noapte. Ar fi ca și cum ai agita un steag enorm pentru a semnaliza ceva, un steag foarte vizibil: am văzut eu însumi, cu ochii liberi, într-un amurg limpede de iarnă, evoluțiile stolurilor la vreo zece kilometri de mine; erau mici pete cenușii care se mișcau asemenea unor amibe pe fundalul unui cer care încă avea, puțin deasupra liniei orizontului, o fâșie îngustă de un alb luminos. Primele grupuri mici care se întorc de pe câmp încep să danseze, iar dansul devine din ce în ce mai frenetic pe măsură ce scade lumina. Treptat, sosesc și cei rămași în urmă, astfel că, încet, se formează stoluri de mii și mii de indivizi care, cam la o jumătate de oră după apus, când lumina dispare, se năpustesc asupra copacilor aleși ca loc de înnoptare, care-i înghit ca o dolină.

Adeseori, pe lângă grauri își face apariția șoimul călător, în căutarea cinei; dacă nu suntem cu luare-aminte, trece neobservat: atenția ne este concentrată asupra graurilor, iar șoimul e remarcat numai de cei care-l caută în mod special. Chiar dacă șoimul călător e un prădător cu o deschidere a aripilor de un metru — care poate ajunge în picaj la o viteză de peste două sute de kilometri pe oră —, graurii nu sunt o pradă ușoară. O ciocnire în zbor cu un graur îi poate provoca șoimului o fractură a aripilor lui fragile, incident mortal fără niciun dubiu. În consecință, șoimul nu îndrăznește să intre în stol, ci încearcă să prindă exemplare de la margini. Graurii reacționează la atacul șoimului, înghesuindu-se unii într-alții, strângând rândurile și schimbându-și rapid direcția ca să poată scăpa de ghearele fatale. Unele dintre cele mai spectaculoase evoluții ale graurilor sunt cauzate tocmai de încercările lor de a evita atacurile repetate ale șoimului călător, care e nevoit să exerseze serios înainte de a obține o pradă. E posibil ca multe comportamente ale graurilor să fie motivate de necesitatea de a supraviețui acestor teribile atacuri.

Experimentul

Să revenim la proiectul nostru. Prima dificultate era obținerea unei imagini tridimensionale a stolului și a formei sale pentru ca apoi, combinând mai multe imagini succesive, să reconstruim o filmare în 3D. În teorie, părea ușor și problema se putea rezolva simplu: toată lumea știe că pentru a vedea 3D e suficient să folosești doi ochi. Când privești în același timp din două puncte diferite — chiar dacă apropiate, cum sunt ochii noștri —, creierul are posibilitatea să „calculeze” distanța la care se află un obiect și deci să construiască imagini tridimensionale. Cu un singur ochi, pierdem profunzimea imaginii. Vă puteți convinge ușor închizând un ochi și încercând să luați cu mâna un obiect din fața voastră: mâna îl va căuta mai departe sau mai aproape decât se află el în realitate. Iar dacă încercați să jucați tenis sau ping-pong cu un ochi acoperit, atunci aveți asigurată înfrângerea. Totuși, sistemul funcționează bine doar dacă suntem în stare să identificăm pasărea din aparatul de fotografiat din stânga cu cea din aparatul de fotografiat din dreapta, operație care se poate

transforma într-un coșmar când în ambele fotografii sunt mii de păsări.

Era clar că nu aveam să ne plictisim. În studiile prezente în literatura științifică existau câteva reconstituiri fotografice 3D cu cel mult douăzeci de animale; identificarea se făcuse manual. Or, noi voiam să reconstituim multe fotografii, fiecare având câteva mii de păsări. Evident, nu se putea lucra manual și trebuia să folosim calculatorul pentru identificare.

Să te apuci de o problemă înainte de a fi pregătit cum se cuvine e o invitație la dezastru. Am format un grup din care făceau parte fizicieni (în afară de mine, profesorul meu, Nicola Cabibbo, și doi dintre cei mai buni elevi ai mei, Andrea Cavagna și Irene Giardina) și doi ornitologi (Enrico Alleva și Claudio Carere). În 2004, alături de regretatul economist Marcello de Cecco și de alte grupuri europene, am depus o cerere de finanțare la Comunitatea Europeană, care ne-a fost acceptată: începeam lucrul, puteam implica masteranzi și doctoranzi, puteam cumpăra aparatura.

Ne-am plasat aparatele de fotografiat pe acoperișul Palatului Massimo, sediul minunatului Muzeu Național Roman, care străjuiește piața Gării Termini, aleasă în acei ani (primele date au fost culese între decembrie 2005 și februarie 2006) de stoluri ca unul dintre locurile de înnoptat cele mai aglomerate. Am folosit aparate de fotografiat comerciale din gama cea mai înaltă, pentru că telecamerele aveau încă o definiție prea mică. Două aparate de fotografiat la douăzeci și cinci de metri distanță unul de celălalt garantau determinarea poziției relative a doi grauri aflați la câteva sute de metri de noi cu o precizie spațială de circa zece centimetri, precizie suficientă pentru a distinge acei grauri care zboară la circa un metru unul de celălalt. Am adăugat un al treilea aparat de fotografiat, la mică distanță de celelalte două, care ne folosea când păsările se suprapuneau în unul dintre primele două: acest al treilea aparat a fost esențial în cazurile în care reconstrucția era deosebit de dificilă.

Cele trei aparate declanșau simultan, cu o precizie de o milisecundă (a trebuit să