

ESBARTS D'OCELLS: UN BALL SENSE COREÒGRAF

Javier AGUILAR SÁNCHEZ*

RESUM.- *Esbarts d'ocells: un ball sense coreògrafs.* Idees i teories que varen néixer lluny de les preocupacions diàries de la gent, en el «món» de la física teòrica, es troben actualment molt imbricades en la cultura i forma de pensar de la nostra societat. Continuant amb aquesta tendència, l'objectiu d'aquest article és introduir la noció intrigant d'*emergència*, concepte que queda perfectament exemplificat en examinar com el complex comportament de què fan gala certs esbarts d'ocells pot *emergir* d'un conjunt de regles simples a nivell individual. S'hi presenten pautes generals amb les quals els investigadors s'enfronten a aquests problemes, a més d'alguns models específics amb què es possible simular aquest moviment fascinant.

Paraules clau: Física de sistemes complexos, Simulació, Fenòmens Col·lectius, Matèria Activa, Esbarts d'Estornells.

SUMMARY.- *Flock of Birds: a dance without choreographer.* Many ideas and theories that were born far away from the daily concerns of people, in the "world" of theoretical physics, have become more imbricated with the general thoughts and culture of our society. Keeping on with this tendency, my aim is to introduce the intriguing notion of emergence.

This concept will be perfectly exemplified by examining how the complex shapes of a flock of birds can arise from simple rules at the individual (bird) level. We explain the general approach of scientists when facing this problem, besides some specific models used to simulate this fascinating movement. Finally, applications of this knowledge will be discussed.

Key Words: Physics of complex systems, Simulation, Collective Phenomena, Active Matter, Flocks of starlings.

* Estudiant de màster jvrglrschz@gmail.com Institut de Física Interdisciplinària i Sistemes Complexos IFISC (CSIC-UIB), Campus de la Universitat de les Illes Balears.

I. INTRODUCCIÓ

L'ordre i la sincronització són atractius de d'un punt de vista estètic i pragmàtic. En les nostres vides, usualment els entenem com el resultat dels esforços d'algun «líder» que té un coneixement universal del sistema¹. Estic parlant

de l'arquitecte que organitza els maons en un edifici, el coreògraf d'un espectacle de ball o de tu, quan ordenes la cuina després d'haver-la emprada. Aquesta forma de pensar és la raó per què ens quedam atònits en contemplar aquest ordre i sincronització en la natura. Et podries demanar: qui és el

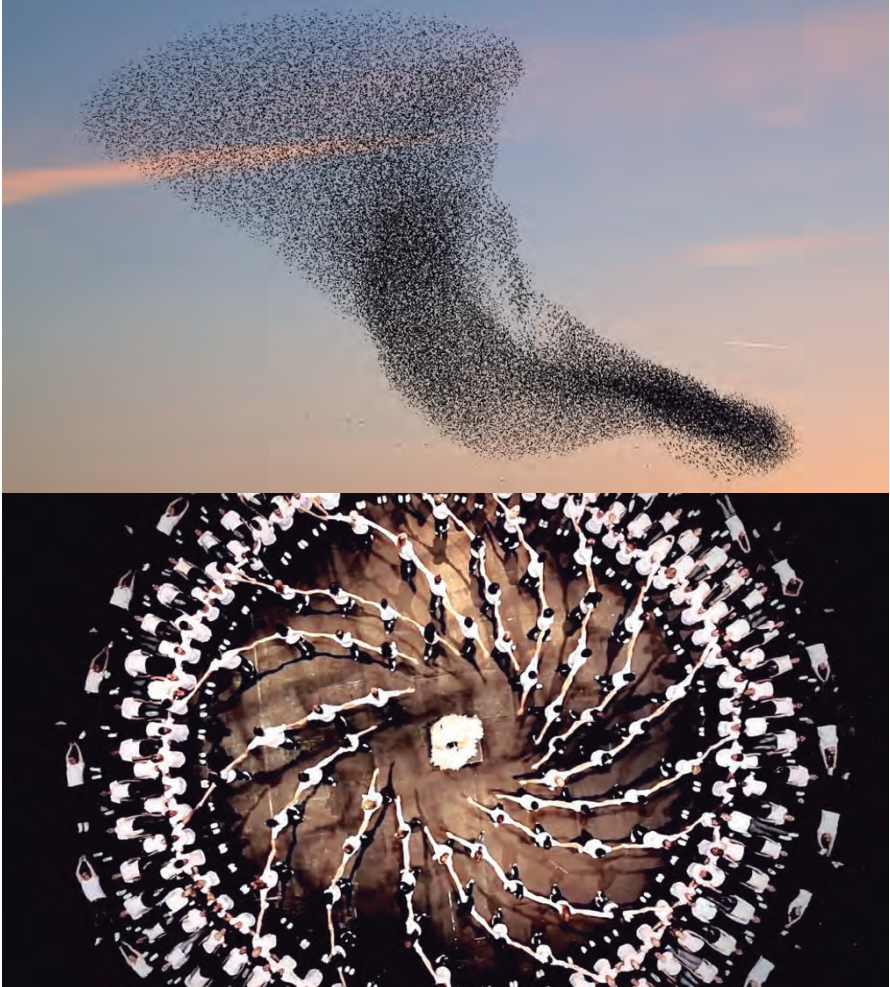


Figura 1. Moviments sincronitzats que emergeixen espontàniament
(dalt) oposats a la coordinació premeditada (baix)**.
*Figure 1. Synchronized movements which arise spontaneously (top)
versus premeditated coordination (bottom)**.*

coreògraf d'un esbart d'estornells? Fan moviments, recordem-ho, en què executen abruptes maniobres, generen formes insòlites i empren un sistema de comunicació increïblement ràpid [8].

Esforsos empírics recents han mostrat algunes propietats meravelloses dels grans grups d'ocells que emfasitzen la no trivialitat del seu moviment. En particular, ens referim als resultats obtinguts en processar la imatge

de vídeos d'esbarts d'estornells que es varen filmar a Roma [4][2] (movie0)**.

En volar, cada estornell està decidint continuament com s'ha de moure d'acord amb la percepció individual i parcial del seu entorn (la resta d'ocells de l'esbart, obstacles, depredadors, etc.). Res de sorprenent, perquè tu fas el mateix en caminar pel carrer. Sens dubte, cada estornell no processarà tota la informació de la resta d'integrants de l'esbart (la qual cosa seria impossible, perquè una d'aquestes agrupacions pot arribar a estar formada per milions d'exemplars). Curiosament, però, cada estornell sembla que es fixa en un número concret (set) dels seus companys [2]. És a dir, sense que importi quin és el número total d'ocells del grup ni com de junts estiguin, a cada estornell només li importaran els seus set companys més propers a l'hora de decidir com moure's.

El segon resultat podria ésser massa abstracte per a una explicació rigorosa, per la qual cosa emprem un exemple: pensa en un esbart d'ocells volant d'una manera coherent en una direcció. Si un dels ocells percep un depredador, es mourà intentant evitar el perill. El moviment, *a priori* individual, esdevindrà ràpidament una maniobra global de tot el grup (una vegada més, independentment de com sigui de gran!). Com a conseqüència d'aquest mecanisme, les maniobres no tindran una escala característica, podran anar des d'uns

pocs centímetres fins a centenars de metres. En el llenguatge dels físics, l'absència d'una *escala característica* és anomenada propietat d'*invariància de l'escala*, que és una peculiaritat dels objectes fractals [4].

A vegades, els científics poden resoldre aquesta manca de «rol d'un líder» emprant la idea d'*emergència*. Això és, el complex comportament col·lectiu apareix *espontàniament* a partir d'una conducta a nivell individual molt més simple.

A través de la resta d'aquest text, ens centrarem a explicar el comportament d'un esbart d'ocells com un comportament emergent. En les seccions II i III, es presenten dos models paradigmàtics i se'n discuteixen amb cura els principals resultats. Dedicarem una atenció especial a generalitats de la modelització matemàtica per acostumar el lector a aquest tipus d'estudis. Finalment, a la secció IV, es discuteixen algunes conclusions generals, així com aplicacions d'aquest coneixement.

II. EL MODEL «BOIDS»

Aclariré què volem dir en parlar de procés de modelització matemàtica. En primer lloc, cal fer un exercici d'abstracció: hem de representar cada ocell mitjançant un objecte matemàtic ben definit. En el nostre cas, un ocell serà una fletxa que ens informarà de la posició i la direcció de desplaçament. Reemplaçar la bellesa i la complexitat de la forma d'un ocell

**<https://www.youtube.com/watch?v=Ay8oeOIH5IQ>

¹ El «sistema», una de les paraules favorites d'un físic, és bàsicament una abstracció que denota l'«objecte d'estudi», sigui allò que sigui.

per una fletxa podria semblar més una simplificació excessiva que no pas una abstracció. Amb tot, emfasitzam que el nostre estudi es limita a consideracions lligades al comportament: cercam regles simples que governin el moviment dels ocells a nivell individual.

En un llenguatge físic, cada ocell és una partícula puntual que segueix les lleis de Newton. Així, aquestes «regles» seran codificades com a *forces*. La nostra tesi planteja que, emprant una bona tria d'aquestes regles, sorgirà un moviment natural de l'esbart. Distingir entre els comportaments d'un ocell i l'esbart és subtil; a pesar de ser «la mateixa cosa», la descripció d'ambdós és marcadament diferent: el moviment individual dels ocells queda descrit per les regles postulades, mentre que la conducta de l'esbart és molt més complexa i difícil de descriure².

La tria d'un determinat conjunt de regles a nivell individual que generi el comportament col·lectiu desitjat no és única. Per raons històriques i cercant la simplicitat, seguirem la prescripció donada per Craig W. Reynolds en el famós model «Boids»³ [9]. Un dels punts claus d'aquest enfocament va ser imposar que cada ocell té una percepció parcial de l'esbart. Aquesta realitat física requereix una «traducció» al llenguatge matemàtic. Així, aquesta percepció parcial és modelitzada definint una distància que anomenem R .

Cada ocell «decidirà» on anar emprant només informació dels seus companys d'esbart, és a dir, de tots els ocells situats a una distància menor que R . Ara estem en condicions de presentar les regles del model «Boids»:

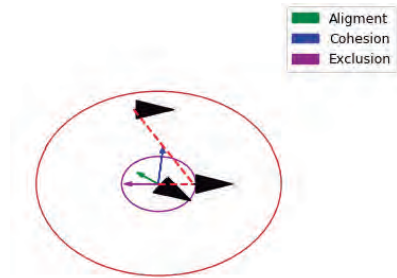


Figura 2. Esquema de les forces actuant sobre un dels nostres ocell-fletxa. Els radis d'acció r i R queden també indicats.

Notam que dos dels ocells són massa lluny per a interactuar mitjançant la regla de separació.
Figure 2. Sketch of forces acting in one of our arrow-birds. The radius r and R are plotted too, we notice that two of the birds are too far to interact with the exclusion rule.

- Cohesió: cada ocell es dirigirà cap als seus companys d'esbart. Aquesta regla assegura que els ocells volaran junts, creant una forma compacta.
- Separació: com que els ocells tendiran a estar a prop, hem d'afegir una component repulsiva que eviti les col·lisions. Definim una nova distància r , de tal manera que $R > r$. Tots els ocells a una distància menor que R s'acostaran, tot i que

² Aquesta distinció és comuna en física, on es parla de *micro* (ocell) i *macro* (esbart) nivells de descripció.

³ El terme «Boid» és una abreviació de «Bird-oid object», que prové de l'argot de la programació orientada a objectes.

els ocells que estiguin més a prop que r tractaran d'allunyar-se.

- Alineació: cada ocell intentarà volar en la mateixa direcció que el seu company d'esbart. Aquesta sembla ser la regla més indispensable per a generar el comportament col·lectiu que cercam [5]. En certa manera, aconsegueix generar els mateixos efectes que les dues anteriors: si dos ocells volen amb la mateixa direcció, mai no col·lisionaran ni s'allunyan. En definitiva, l'alineació permet crear una direcció de desplaçament coherent per a tot l'esbart.
- Velocitat de creuer: la rapidesa amb què vola cada ocell no canvia al llarg del temps. En realitat, el concepte de velocitat de creuer apareix en versions més modernes del model «Boids» [6]. Aquesta regla té un sentit estètic: evita que els ocells s'alenteixin o s'accelerïn de forma poc natural.

Hem fet simulacions basades en Python d'un «esbart de fletxes» que segueix aquestes quatre regles (code). El nostre experiment comença amb un *estat desordenat*, en el qual cada ocell té una orientació i posició escollides a l'atzar (podria correspondre a l'esbart aixecant el vol). En una primera fase, no hi haurà consens entre els ocells pel que fa a la direcció que s'ha de prendre. La densitat del grup serà heterogènia i, la forma, molt variable. No obstant això, en un temps que depèn del número d'ocells i de l'heterogeneïtat de la condició inicial, la majoria dels individus s'alineen en posicions equidistants i segueixen una mateixa direcció de desplaçament. S'han sincronitzat espontàniament!

(movie1). Hi ha ocasions en què alguns ocells no troben companys d'esbart als quals seguir. Sense interacció amb altres ocells, només es podran moure en línia recta i perdran la resta del grup. Fins i tot en els primers instants, en els quals no s'ha arribat a la sincronització, el moviment obtingut sembla natural i suau, creant la sensació d'un «líquid fet de punts discrets», que podem experimentar observant un esbart real d'estornells.

Les regles que regeixen els diferents models solen estar ponderades en la seva «traducció matemàtica» amb quantitats que anomenam *paràmetres*. Ja n'hem introduït dos del nostre model «Boids», els radis d'interacció R i r . Com a exemple, discutirem la importància de R : amb valors baixos, als nostres ocells-fletxa els costarà trobar companys als quals seguir, es formaran petites agrupacions d'ocells sincronitzats, però no podrem parlar d'una sincronització a gran escala. Per altra banda, si R és massa gran, la percepció parcial de l'esbart quedarà violada, de la qual cosa en resultarà un moviment poc natural (tots els ocells seguiran una línia recta). Per tant, la modelització no acaba de trobar les regles subjacents a la natura. L'ajustament dels paràmetres és una tasca delicada i crucial que, en aquest cas, s'ha fet atenent tant a raons estètiques [9] com a l'associació dels paràmetres a dades empíriques [6]. En els següents enllaços es poden trobar exemples de com un mal ajustament dels paràmetres genera esbarts poc realistes (movie2, movie3, movie4, movie5).

III. EL MODEL VICSEK

Així com el model «Boids» va néixer en el context de les ciències de la computació, passam a comentar el model de Vicsek [10], propi de la literatura dels físics. El conjunt de regles es veu sintetitzat; només emprarem la regla d'alineació més una contribució aleatòria. Això és, els ocells tendiran a alinear el seu sentit de desplaçament, però a més, executaran petits moviments en qualsevol direcció sense una raó aparent. La inclusió de l'aleatorietat no només modela l'estocasticitat intrínseca a qualsevol procés biològic, també contempla l'acció de possibles regles no aleatòries (*deterministes*) que ignoram. Es comprova, amb una simulació en FORTRAN (code), que aquest model crea el comportament qualitatiu que esperàvem (movie6). Fer un balanç correcte de l'alineació i de la contribució aleatòria és crucial: si l'alineació hi domina (*fase ordenada*)⁴, el moviment no serà suficientment «ric» per a representar de forma fidedigna la realitat. No obstant això, si l'aleatorietat reina en el sistema, serà impossible que n'emergeixi la sincronització (*fase desordenada*).

La separació entre les fases ordenada i desordenada queda ben delimitada per la qual cosa es coneix com a *punt crític* (vegeu la figura 4). Els punts crítics posseeixen propietats molt característiques, que han estat reconegudes en els esbarts reals, fet que evidencia que els ocells podrien operar a prop d'un punt crític [7]. Això explicaria l'aparició

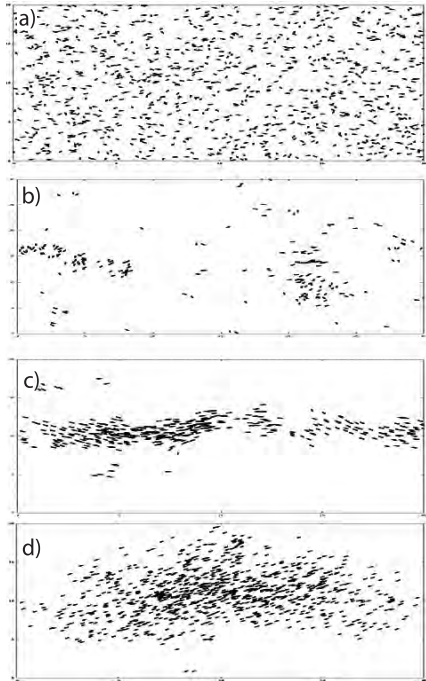


Figura 3. a) Estat desordenat: els ocells-fletxa ocupen homogèniament l'espai i apunten en direccions diferents. b) Situació intermèdia: no hi ha consens sobre la direcció a seguir, tot i que hi ha petites agrupacions d'ocells sincronitzats. c) i d) Exemples d'estats ordenats, en què la sincronització ha emergit espontàniament.

Figure 3. a) *Disordered state, every bird points in a different direction and they fill the space homogeneously.* b) *The intermediate situation, there is no consensus about what direction to follow, yet there are some clusters of synchronized birds.* c) and d) *are examples of ordered states, synchronization has emerged spontaneously.*

⁴ Aquí, ordre significa «ocells apuntant en la mateixa direcció».

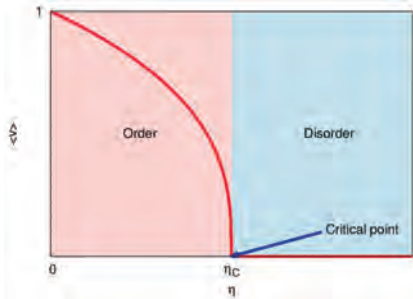


Figura 4. Típic diagrama de fase, $\langle v \rangle$, que informa de com d'ordenat està el sistema. Si $\langle v \rangle = 0$, cada ocell apuntarà a una direcció diferent i el sistema estarà en l'estat desordenat. D'altra banda, si $\langle v \rangle \neq 0$, el sistema es trobarà en l'estat ordenat. Aquestes dues fases estan separades pel punt crític η_c . η , representa la «força de l'aleatorietat». Vegeu [10] per a una definició rigorosa de $\langle v \rangle$ i η .

Figure 4. Typical Phase diagram of a phase transition. $\langle v \rangle$ informs of how ordered the system is, if $\langle v \rangle = 0$, every bird will point to a different direction and the system will be in the disordered state. On the other hand, if $\langle v \rangle \neq 0$ the system will be in the ordered phase. These two phases are separated by the critical point η_c . η , represents "the strength of the randomness", see [10] for a proper definition of $\langle v \rangle$ and η .

d'estructures invariants d'escala en els esbarts d'estornells [4]. Encara més, ésser a prop d'un punt crític conduiria al perfecte balanç entre ser a l'estat ordenat (on els ocells estan més exposats a l'atac d'un depredador) i l'estat desordenat (en el qual hi ha un malbaratament d'energia).

IV. CONCLUSIONS

Els models de «Boids» [9] i «Vicsek» [10] ens permeten mostrar qualitativament que el moviment sincronitzat d'un esbart d'ocells pot ésser entès com un fenomen emergent. Així, l'esbart d'ocells és un bon exemple de com un comportament conegut i simple a nivell individual pot generar conductes col·lectives no trivials. Aquest efecte queda meravellosament resumit en el «mantra» de la física de sistemes complexos «*More is different*» (Més és diferent)[1].

Més encara, és possible de prendre mesures que assegurin quantitativament que els resultats derivats d'uns models més complets [6] s'ajusten a la realitat. Aquests models són bastant més complicats que els que s'han discutit al llarg d'aquest treball. Tenen en compte regles associades a la morfologia dels ocells, així com efectes gravitatoris (és més difícil volar cap amunt), per anomenar-ne algunes diferències.

El model de «Boids» es va emprar per a generar conjunts d'animals en pel·lícules d'animació i efectes especials (*Stanley & Stella in Breaking the Ice 1987, Batman Returns 1992, movie7*). Actualment, s'utilitzen models més moderns, tot i que preval la mateixa filosofia, en paraules de Craig W. Reynolds: «(...) *L'animador* (d'efectes especials i pel·lícules d'animació) *és més un dissenyador de comportament que de moviment*»⁵.

Sembla que el comportament emergent de què hem estat parlant és comú en molts tipus d'animals

⁵ Traducció lliure de l'anglès. L'original diu: «(...) the animator is less a designer of motion and more a designer of behavior».

que es mouen en «forma d'eixam» (moles de peixos, ramats d'animals terrestres, etc.)[3]. Fins i tot, podem trobar aquests patrons, en diferents escales, en la sincronització dels flagels d'espermatozoides [5]. Així, l'aparició d'aquest tipus de moviment no depèn fortament dels detalls de cada espècie, sinó de generalitats del comportament. Aquesta *universalitat* té un interès major en investigacions recents en què els «models d'esbarts» són emprats per a dissenyar dispositius sintètics a escales microscòpiques que podran administrar fàrmacs o modificar propietats del nostre cos [5].

V. AGRAÏMENTS

En primer lloc, voldria agrair a Carlos López-Jurado Marquès que m'hagi ofert la possibilitat d'escriure aquest article. Agraesc de la mateixa manera l'ajuda rebuda pel personal investigador de l'IFISC, en particular a Maxi San Miguel pels seus útils comentaris sobre el text, i a Tomás Sintès per indicar-me les referències necessàries per a elaborar les simulacions.

VI. BIBLIOGRAFIA

- [1] PHILIP W ANDERSON *et al.* 1972. More is different. *Science*, 177 (4047): 393–396.
- [2] MICHELE BALLERINI, NICOLA CABIBBO, RAPHAEL CANDELIER, ANDREA CAVAGNA, EVARISTO CISBANI, IRENE GIARDINA, VIVIEN LECOMTE, ALBERTO ORLANDI, GIORGIO PARISI, ANDREA PROCACCINI, *et al.* 2008. Interaction ruling animal collective behavior depends on topological rather than metric distance: Evidence from a field study.

Proceedings of the national academy of sciences, 105(4):1232–1237.

- [3] CLEMENS BECHINGER, ROBERTO DI LEONARDO, Hartmut LÖWEN, Charles REICHHARDT, Giorgio VOLPE, and Giovanni VOLPE. 2016. Active particles in complex and crowded environments. *Reviews of Modern Physics*, 88(4):045006.
- [4] ANDREA CAVAGNA, ALESSIO CIMARELLI, IRENE GIARDINA, GIORGIO PARISI, RAFFAELE SANTAGATI, FABIO STEFANINI, and MASSIMILIANO VIALE. 2010. Scale-free correlations in starling flocks. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107 (26):11865–11870.
- [5] JENS ELGETI and GERHARD WINKLER. 2015. Physics of microswimmers, single particle motion and collective behavior. *Reports on progress in physics*, 78(5):056601.
- [6] CHARLOTTE K. HEMELRIJK and HANNO HILDENBRANDT. 2011. Some causes of the variable shape of flocks of birds. *PLoS one*, 6(8):e22479.
- [7] MIGUEL A. MUÑOZ. 2017. Colloquium: Criticality and dynamical scaling in living systems. *arXiv preprint arXiv:1712.04499*.
- [8] WAYNE K. POTTS. 1984. The chorus-line hypothesis of manoeuvre coordination in avian flocks. *Nature*, 309(5966):344–345.
- [9] CRAIG W. REYNOLDS. 1987. Flocks, herds and schools: A distributed behavioral model. *Computer Graphics*, 21(4):25–34.
- [10] TAMÁS VICSEK, ANDRÁS CZIRÓK, ESHEL BEN-JACOB, INON COHEN, and OFER SHOCHET. 1995. Novel type of phase transition in a system of self-driven particles. *Physical review letters*, 75(6):1226.

Totes les adreces URL dels vídeos:
<https://github.com/jvrglr/Flocking>

(Rebut: 26.03.2018; Acceptat: 10.05.2018)