

Introducción a los Sistemas Complejos

Sesión 2: Movimiento Colectivo, Materia Activa y Auto-Organización

Santiago, Chile – 3, 5, 7 y 7 de octubre, 2016 – 19:30 a 22:00hrs

La Casa de Goethe / Santiago Maker Space – Cristián Huepe, PhD

► Movimiento Colectivo, Materia Activa y Auto-Organización

- De la física estadística a la materia activa y el movimiento colectivo
- Enjambres (*swarms*) en biología, ingeniería y física
- Experimento con mini-robots (Ejercicio)
- Analizando cardúmenes experimentalmente
- Sobre plagas de langostas, canibalismo y universalidad
- Aplicaciones: *swarm intelligence*, movimiento humano y colapsos de mercado



Breve Repaso

¿Qué es un sistema complejo?

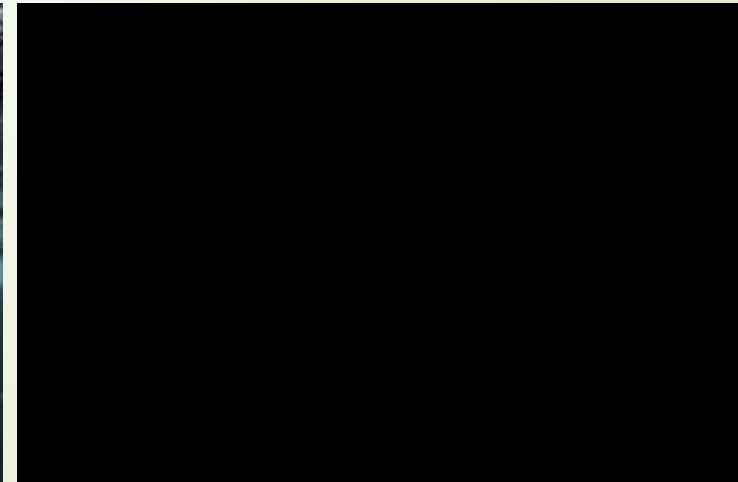
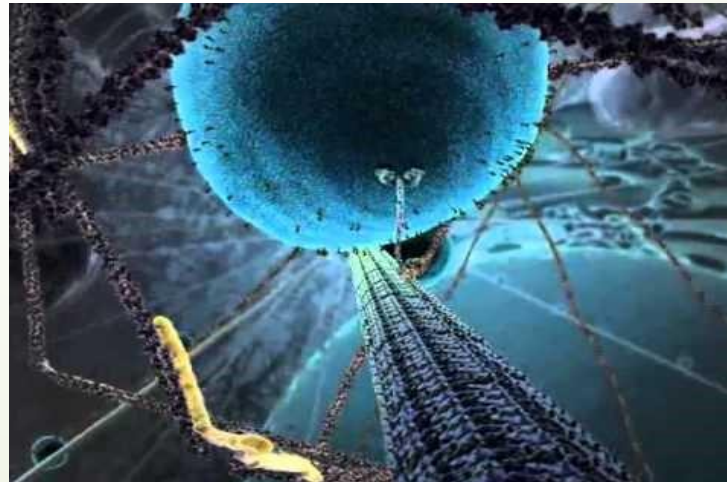
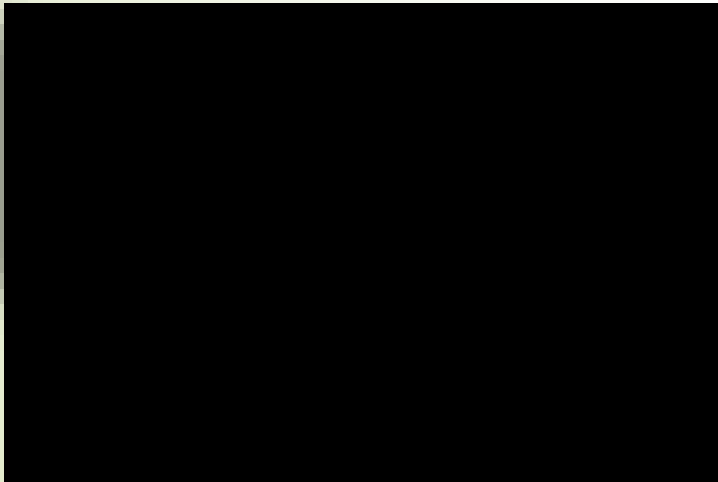
Autómatas celulares

Descripción inicial redes complejas

¿Qué es un sistema complejo?

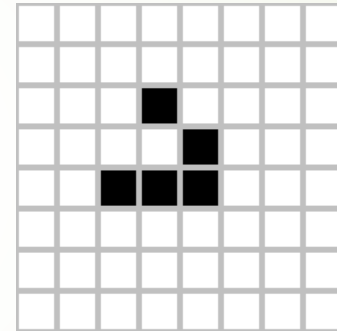
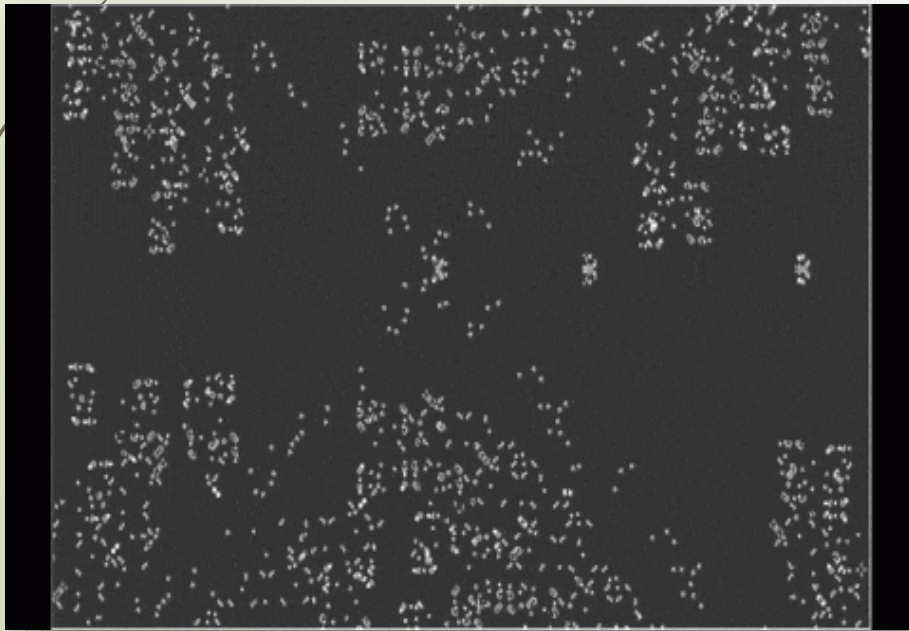
► Son sistemas:

- Sin promedio representativo y no lineal
- Fuera de equilibrio
- Con propiedades emergentes
- En que **el todo es más que la suma de las partes**
- Pueden ser: auto-organizados / caóticos / estadísticos
- Pueden ser: físicos / tecnológicos / biológicos / humanos



Autómatas Celulares

- **Modelo matemático** que describe un **conjunto de celdas** que se **encienden o apagan** a cada paso (discreto) en función del **estado de las celdas vecinas**.
- Autómatas Celulares **bidimensionales**:



https://es.wikipedia.org/wiki/Aut%C3%B3mata_celular

<http://mathworld.wolfram.com/ElementaryCellularAutomaton.html>

Autómatas Celulares

► Autómatas Celulares **unidimensionales**

- Permiten estudiar sistemáticamente la relación entre **reglas simples** y **estructuras complejas**
- Número total de **combinaciones** de reglas $2^8 = 256$

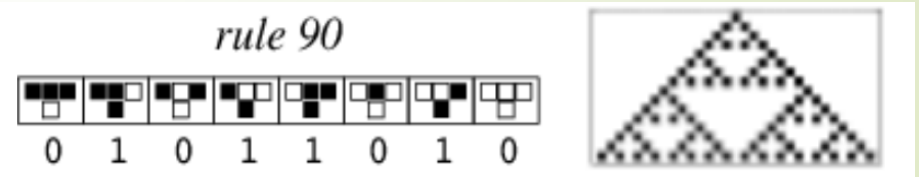
○ **Regla 30** - - - Dinámica caótica:



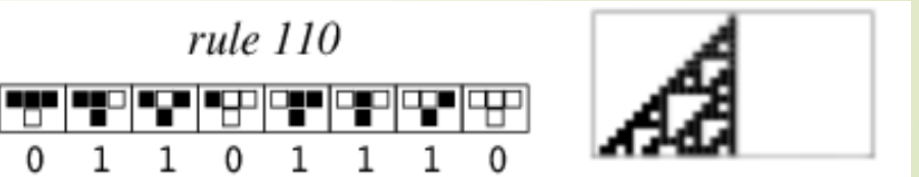
○ **Regla 62** - - Estructura no simétrica:



○ **Regla 90** - - Estructura fractal:

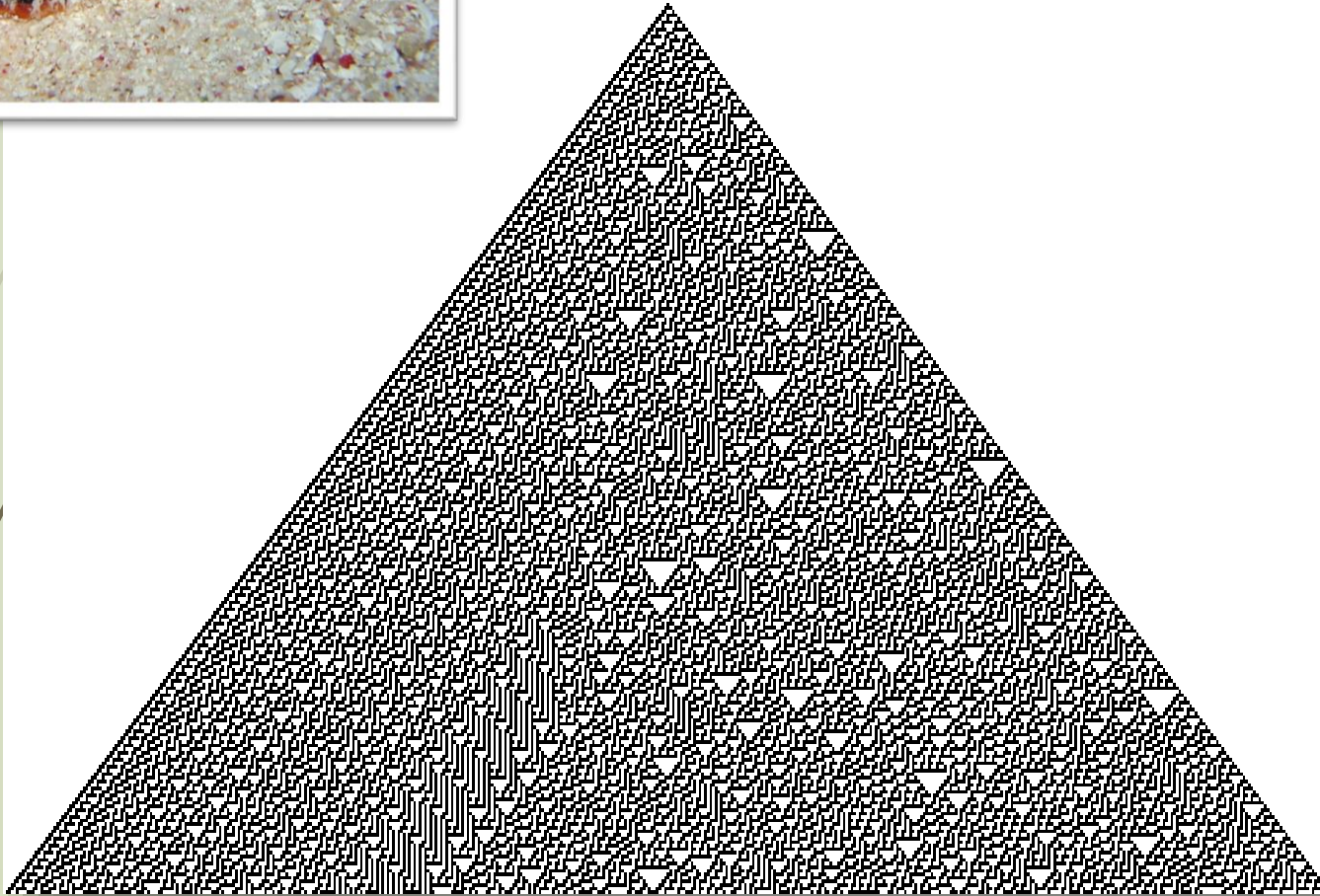


○ **Regla 110** - Dinámica orden/desorden:

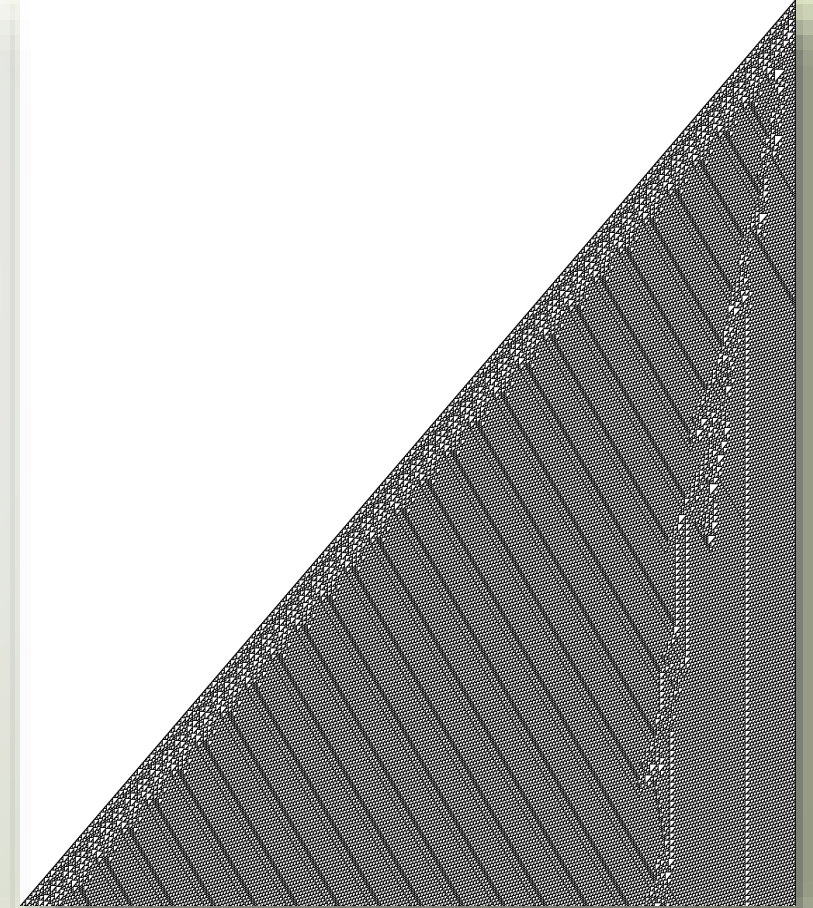


Autómatas Celulares

Regla 30



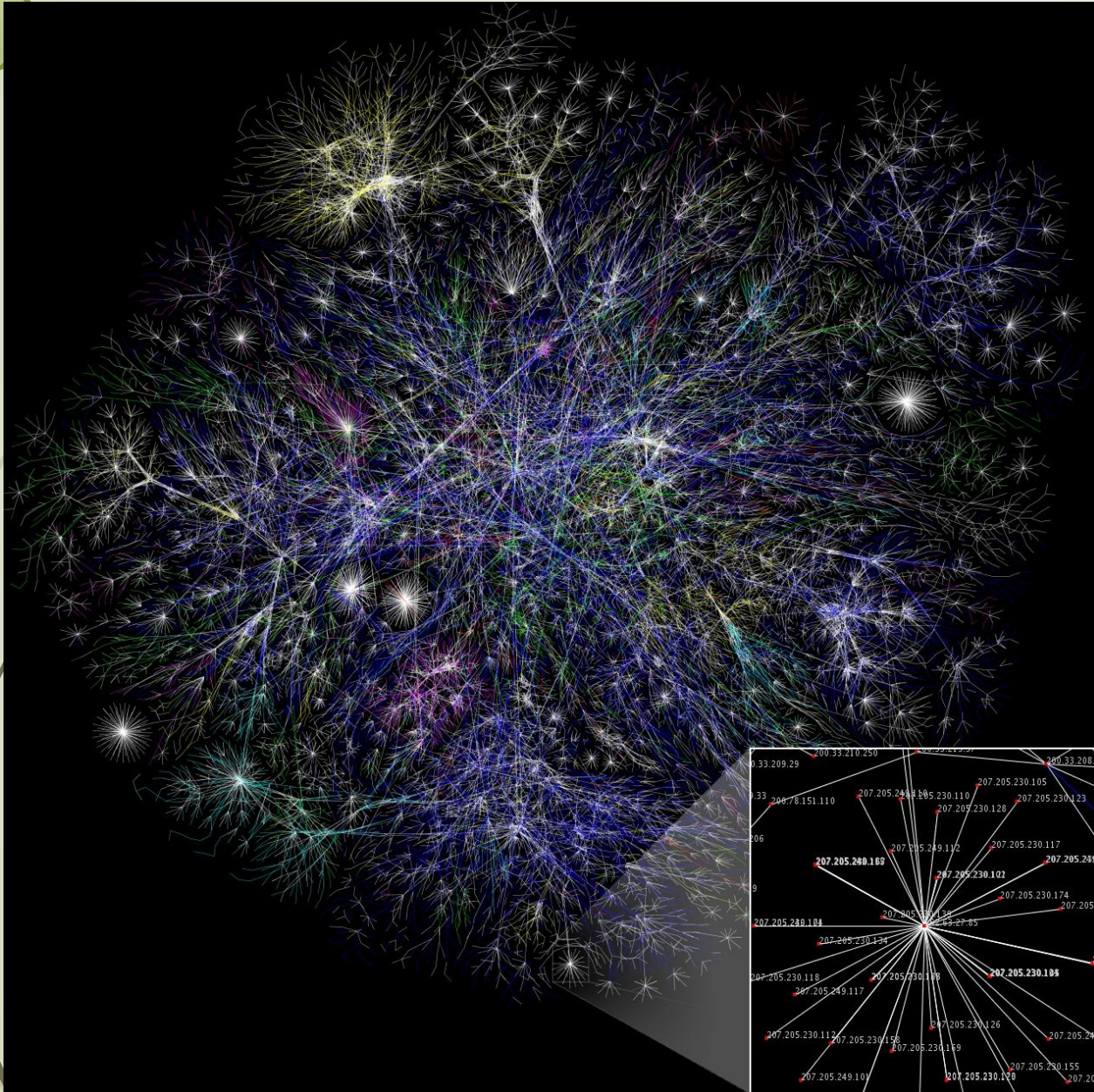
Regla 110





Ejemplos/Repaso Redes Complejas

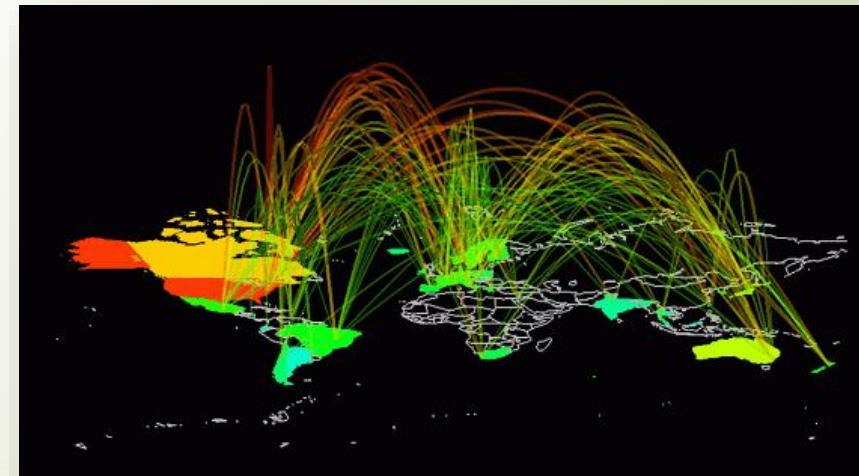
➤ Páginas web y enlaces



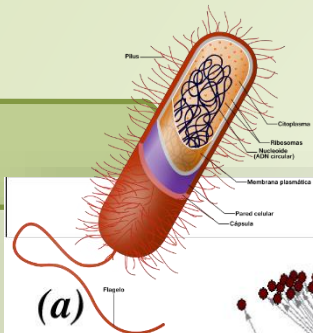
Ejemplos de Redes:

Ej.1) Redes de internet

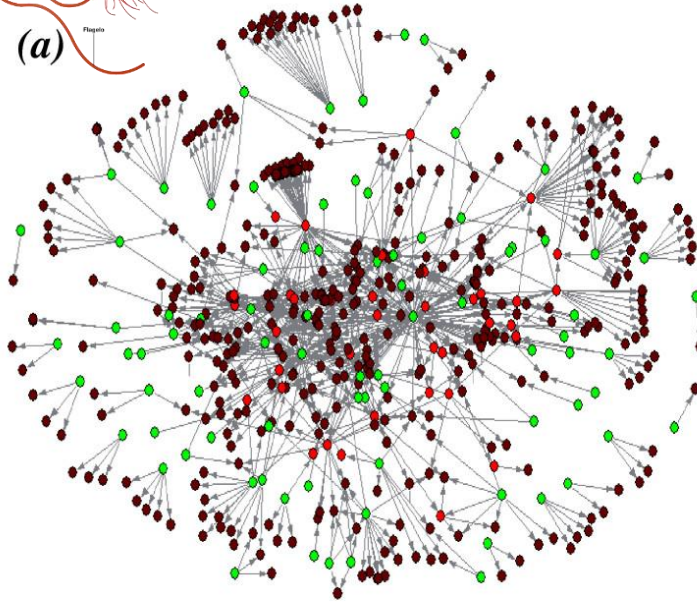
➤ Tráfico de internet



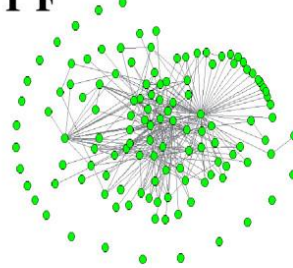
Ej.2) Redes de transcripción (intracelular)



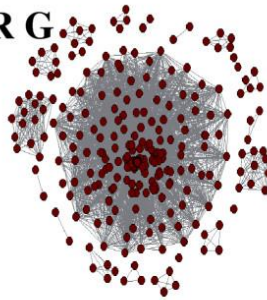
E. coli



(b) T F

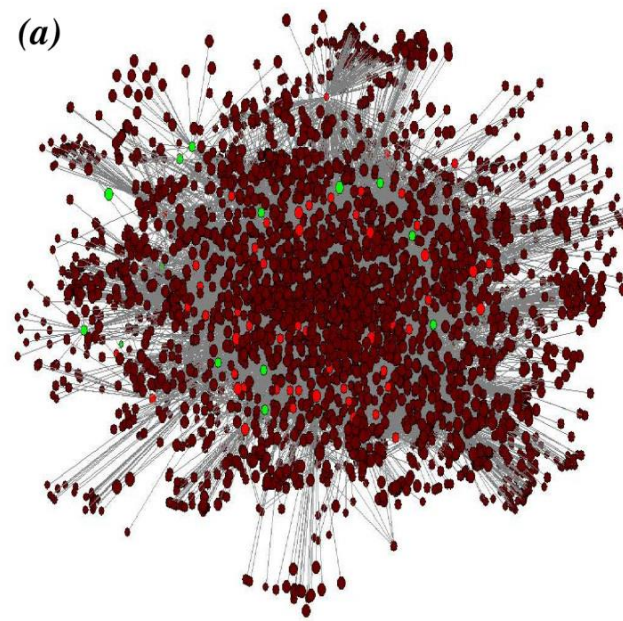


(c) R G

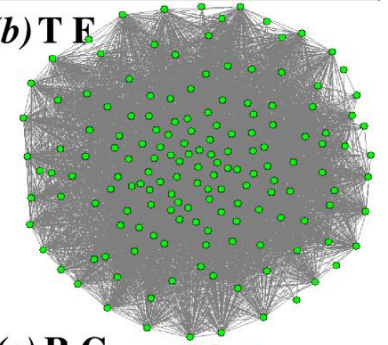


S. cerevisiae

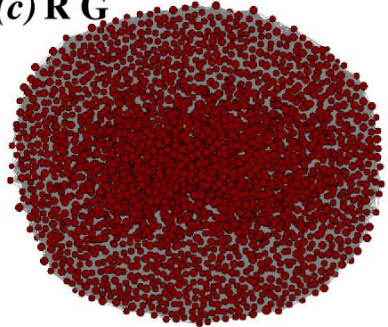
(a)



(b) T F

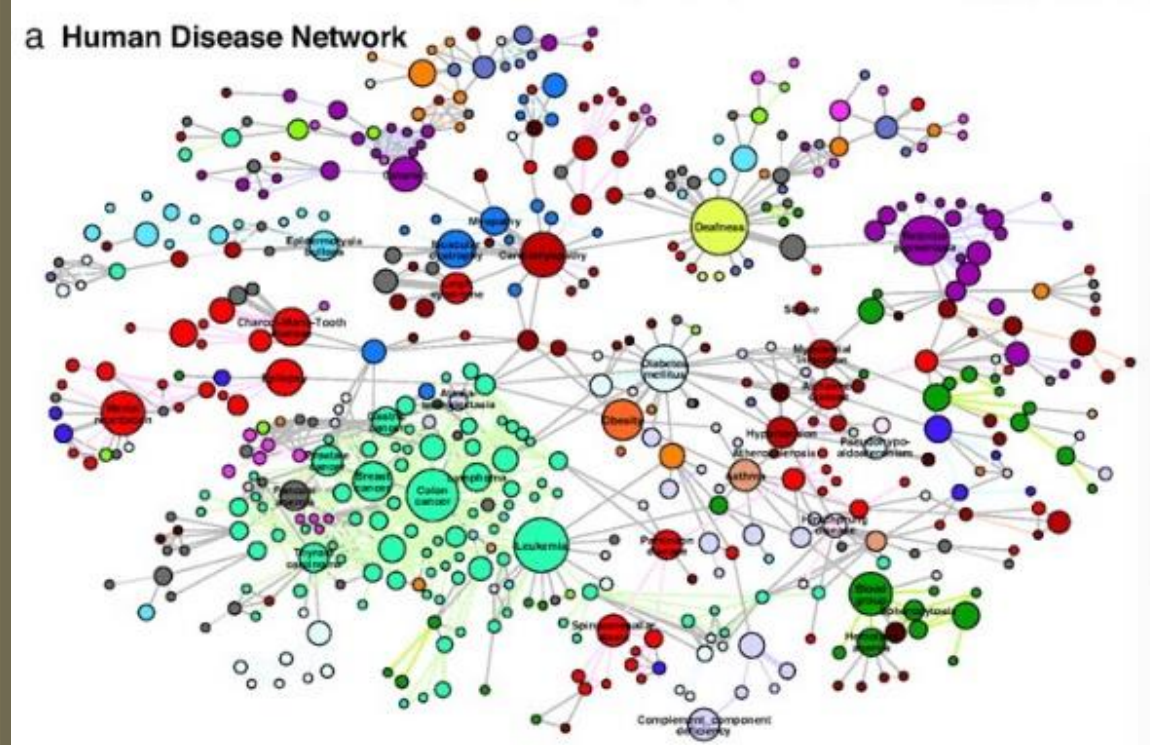


(c) R G



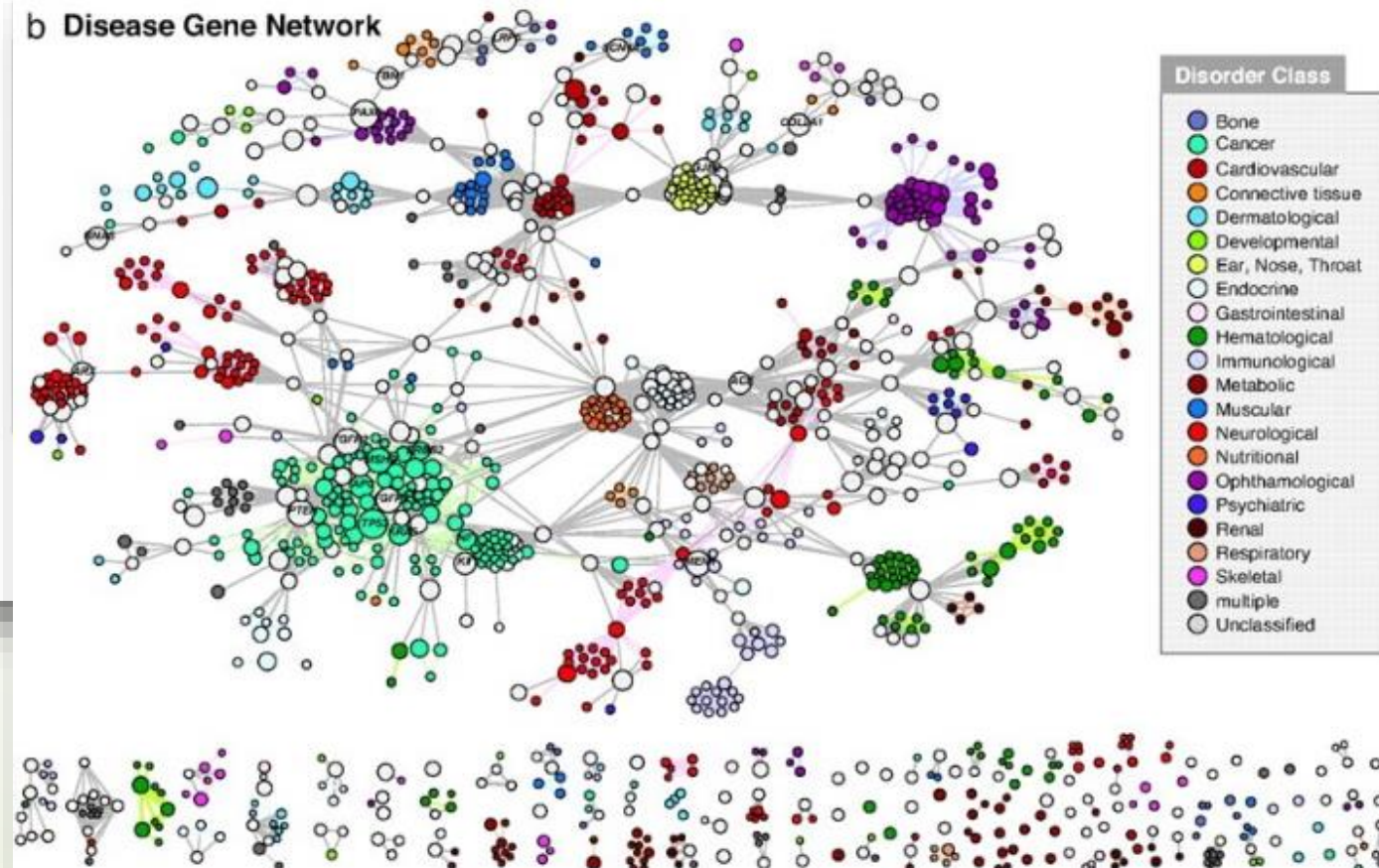
- **Nodos verdes:** Factores de transcripción (proteínas que participan en la regulación de la transcripción de genes de ADN, es decir de su expresión en otras proteínas funcionales)
- **Nodos café:** Genes regulados
- **Nodos rojos:** Ambas funciones
- **E. Coli:** *Escherichia Coli* (bacteria procariota –sin núcleo– muy estudiada)
- **S. Cervisiae:** *Saccharomyces cerevisiae* (levadura de cerveza –hongo unicelular)

Ej. 3) Red de enfermedades



Nodos: Enfermedades
Enlaces: Genes compartidos

Nodos: Genes
Enlaces: Enfermedades compartidas



Familias de redes más estudiadas

- Redes (grafos) **aleatorias** (de Erdős–Rényi)
 - Se crean conexiones entre nodos al azar
 - Distribución de grado: Distribución de Poisson
- Redes de **mundo pequeño** (*small-world networks*)
 - Se crean “atajos” en redes regulares
 - Distancia entre nodos decrece drásticamente
- Redes **libres de escala** (*scale-free networks*)
 - Proceso de conexión preferencial (*preferential attachment*)
 - Distribución de grado: Ley de potencia (de “cola larga”)



De física estadística a materia activa y movimiento colectivo

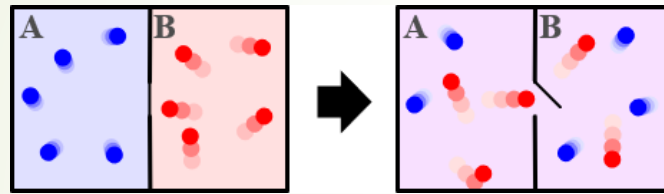
Nociones de física estadística (historia, temperatura y transiciones de fase)

De equilibrio a fuera de equilibrio (definiciones)

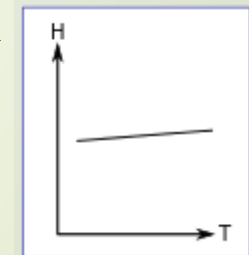
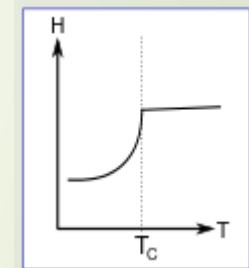
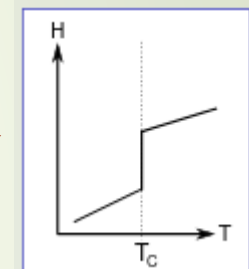
Materia activa (explicación genérica, ejemplos)

Nociones de física estadística

- Historia: **Ludwig Eduard Boltzmann** (1844–1906)
- Interpretación estadística de la **termodinámica** de gases en equilibrio
 - Usa el **teorema del límite central** para promediar cantidades estadísticas
 - Considera la temperatura (velocidad), densidad y presión (fuerza “de rebote”)



- Transiciones de fase:
 - de primer orden
 - de segundo orden
 - de Kosterlitz-Thouless –fuera de equilibrio (premios Nobel 2016!)



- De la física en **equilibrio** a la física **fuera de equilibrio**
 - **Equilibrio**: Satisface balance detallado (no hay flujos)
 - **Fuera de equilibrio**: No satisface balance detallado (sí hay flujos)
- Extensiones a sistemas fuera de equilibrio (**enjambres**)



Enjambres (*swarms*) en biología, ingeniería y física

Perspectiva biológica

Perspectiva computacional

Perspectiva física

Perspectiva robótica

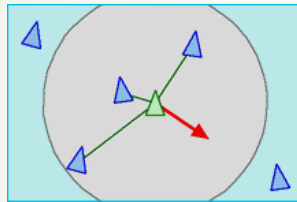
Motivación Biológica

- El **Movimiento Colectivo** se observa en una diversidad de especies animales: desde las bacterias hasta los humanos
- Los **cardúmenes** de peces y **bandadas** de aves tienen hasta **varios miles de individuos**
- **Enjambres de Langostas** pueden tener hasta **10^9 insectos** que viajan miles de kilómetros

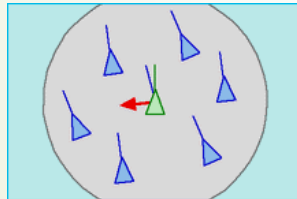
❑ **Algoritmo de bandada** (Craig Reynolds – Sony)

- Flocks, Herds, and Schools: A Distributed Behavioral Model
Computer Graphics, **21**(4), pp. 25-34, 1987
- Definió **Boids** usando reglas de interacción simple

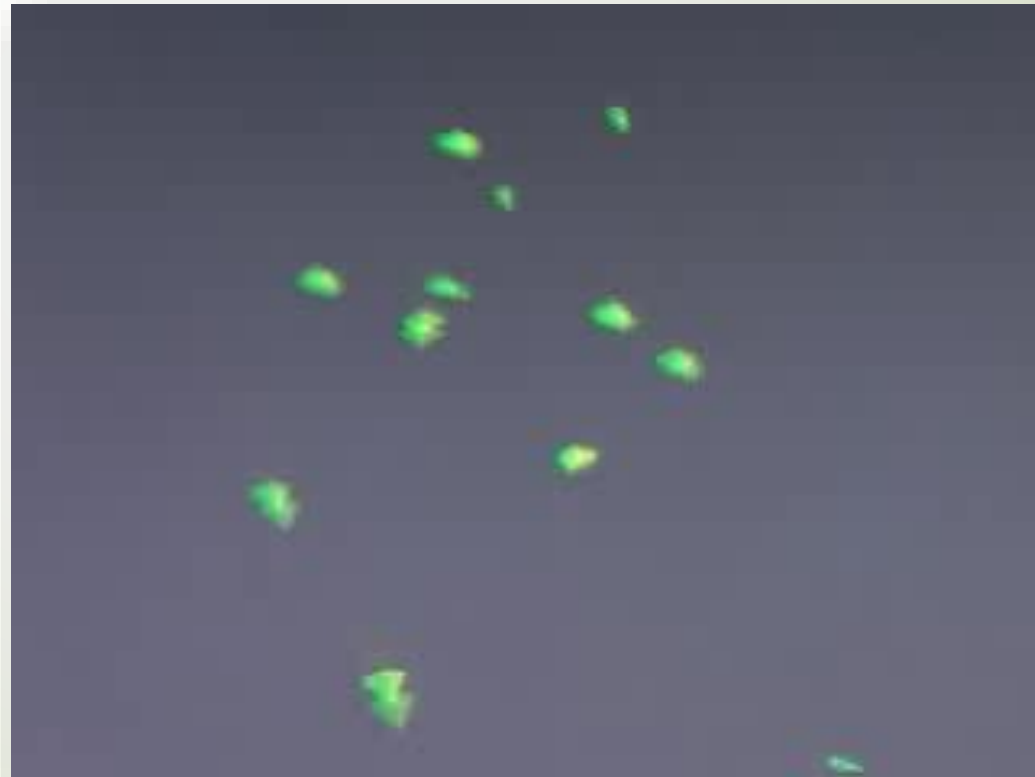
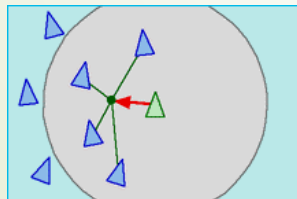
• Separación



• Alineamiento

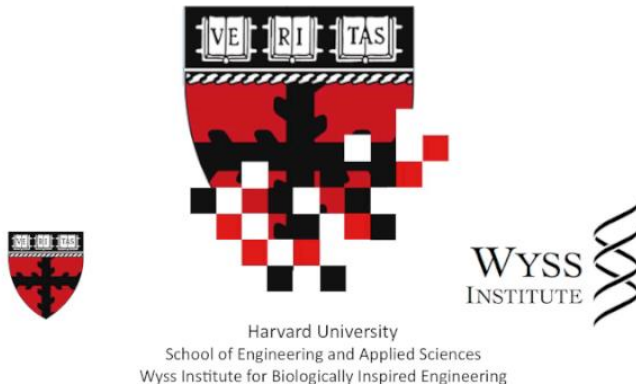


• Cohesión





Self-Organizing Systems Research Group



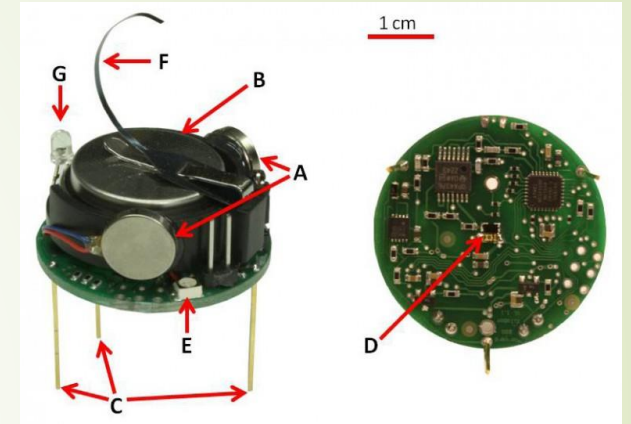
- ❑ Los **grupos de robots** se utilizarán, por ejemplo, para:
 - Posicionar redes de sensores
 - Realizar tareas paralelas
 - Aplicaciones micro-robóticas
- ❑ Los **algoritmos de control** para grupos de robots autónomos deben ser:
 - **Descentralizados, Escalables, Robustos**
- ❑ **Requerimientos adicionales**
 - **Bajo poder de procesamiento** y de transmisión de **información**
 - **Comunicación limitada** (vecinos cercanos, o sólo en línea recta, o sólo mediante contacto directo)

Kilobots, Bristlebots (cepillos vibrantes) y Hexbugs Nano

- Mini-robots para el estudio de robótica de enjambres (swarm robotics)
- Primer experimento con 1000 robots usando kilobots



Moving robots then edge-follow until they enter the desired shape, as determined by a collectively constructed coordinate system.



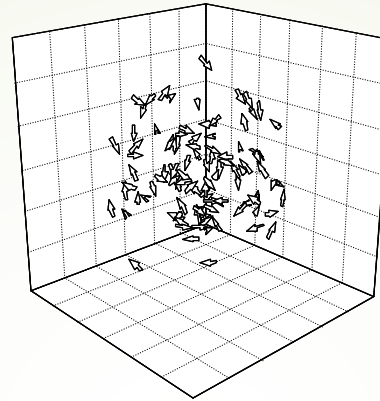
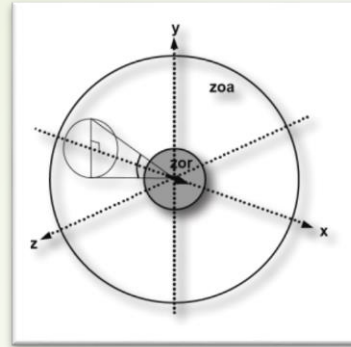
<https://www.youtube.com/watch?v=JmyIJSYw77g>



BREAK / INTERMEDIO

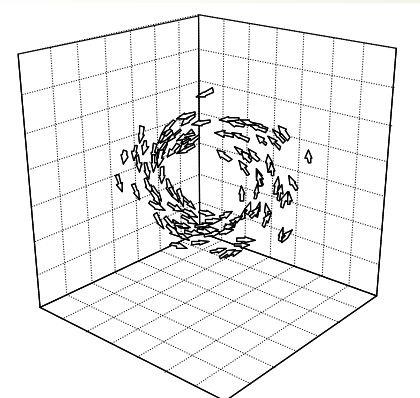
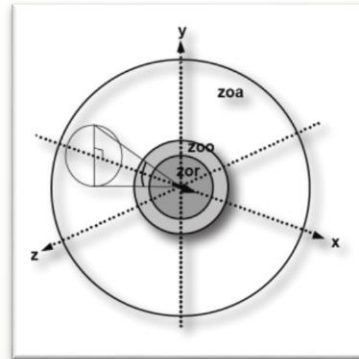
...y experimento con mini-robots

- Enjambre tipo insecto

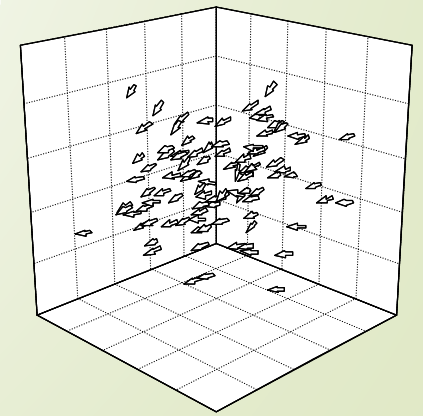
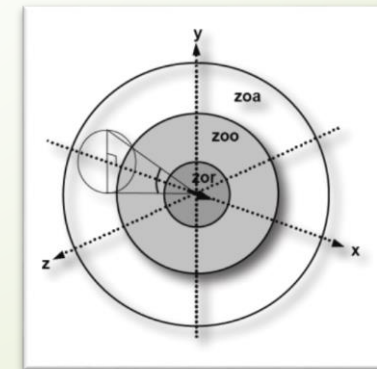


El modelo de zonas

- Movimiento circular



- Migración, bandadas



*Journal of Theoretical
Biology* (2002) **218**, 1-11
I. D. Couzin, J. Krause,
R. James, G. D. Ruxton &
N. R. Franks

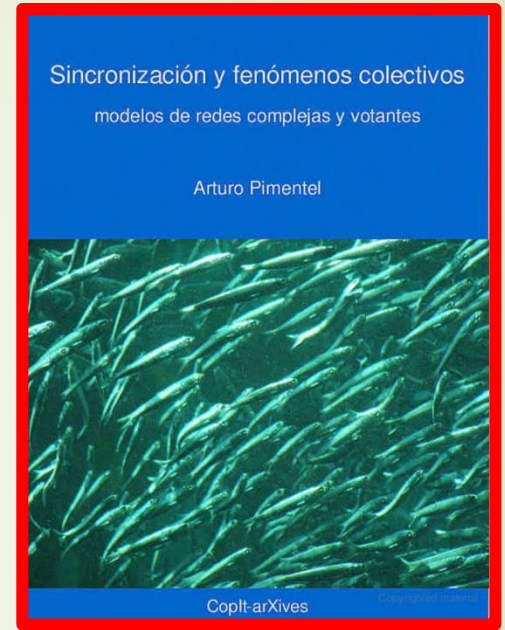
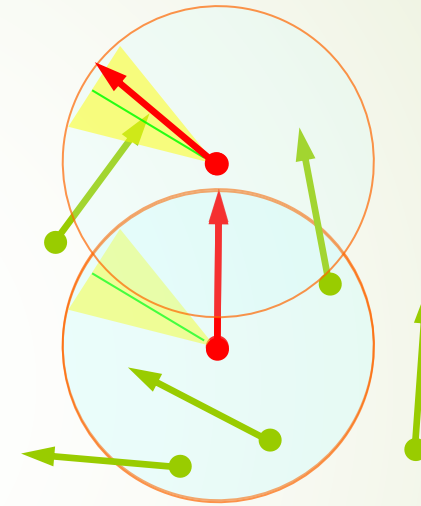
<https://books.google.cl/books?id=yNv3DF6uLjEC&lpg=PA15&ots=rYwOXbVynS&dq=modelo%20de%20vicsek&pg=PP2#v=onepage&q&f=false>

❑ Motivación

- Sistema estadístico auto-organizado, fuera de equilibrio
- La energía se introduce en las escalas más pequeñas consideradas
- Analogía con sistemas biológicos

❑ El modelo de Vicsek (1995)

- Promediar la dirección de movimiento de los vecinos
- Avanzar a rapidez constante en esa dirección

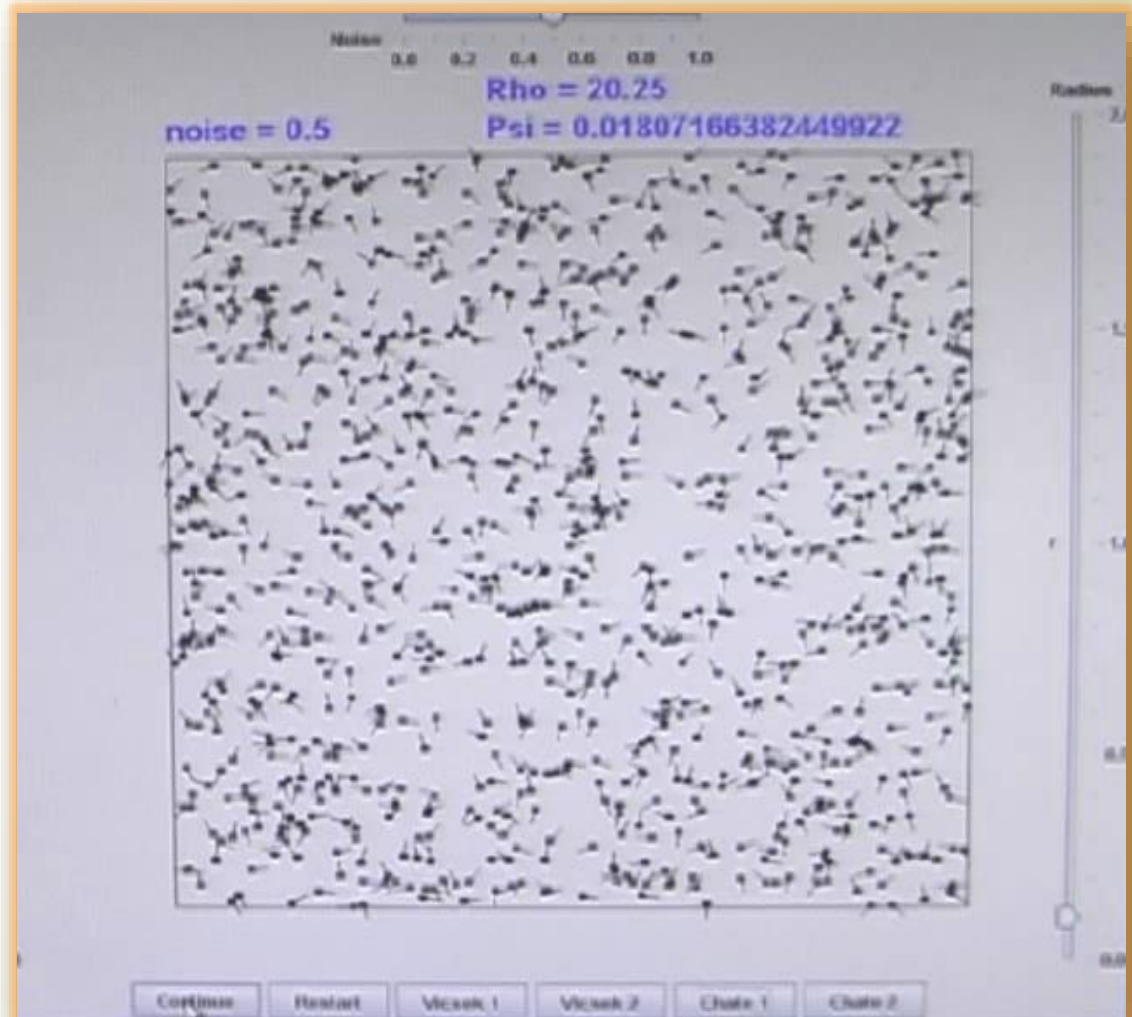


$$\theta_i(t + \Delta t) = \text{Ang} \left\{ \sum_{j \in Z_i(t)} \vec{v}_j(t) \right\} + \eta \xi_i(t)$$
$$\vec{x}_i(t + \Delta t) = \vec{x}_i(t) + \vec{v}_i(t) \Delta t.$$

❑ Simulación del modelo de Vicsek

$$\theta_i(t + \Delta t) = \text{Ang} \left\{ \sum_{Z_i(t)} \vec{V}_{el} [\theta_j(t)] \right\} + \eta \xi_i(t)$$

$$\vec{x}_i(t + \Delta t) = \vec{x}_i(t) + \vec{V}_{el} [\theta_i(t)] \Delta t.$$



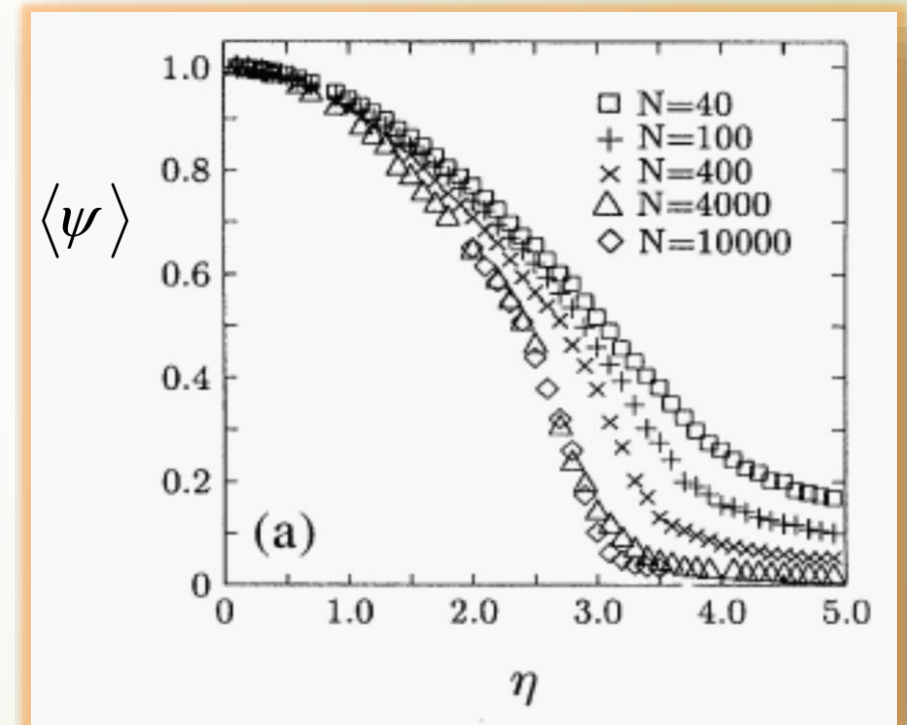
❑ Parámetro de orden

$$\psi(t) = \frac{1}{Ns} \left| \sum_{i=1}^N \vec{v}_{el}[\theta_i(t)] \right|$$

- Grado de alineamiento
- En paralelo con ferromagnetismo: Magnetización

❑ Resultado principal

- “Nuevo tipo” de **transición de fase**
- Parecía contradecir al teorema de Mermin-Wagner





Analizando cardúmenes experimentalmente

Transiciones de estado

El problema inverso

Decisiones colectivas

El experimento en Princeton

<http://icouzin.princeton.edu/>

- **El desafío:** Construir el primer experimento completamente controlado y monitoreado de movimiento de cardúmenes
- **Las ideas:**
 - Poder experimentar con hasta 1000 peces
 - Reducir el sistema a dos dimensiones
 - Desarrollar un método de seguimiento automatizado
- **Los actores:**



Dr. Yael Katz



Prof. Kolbjørn Tunstrøm

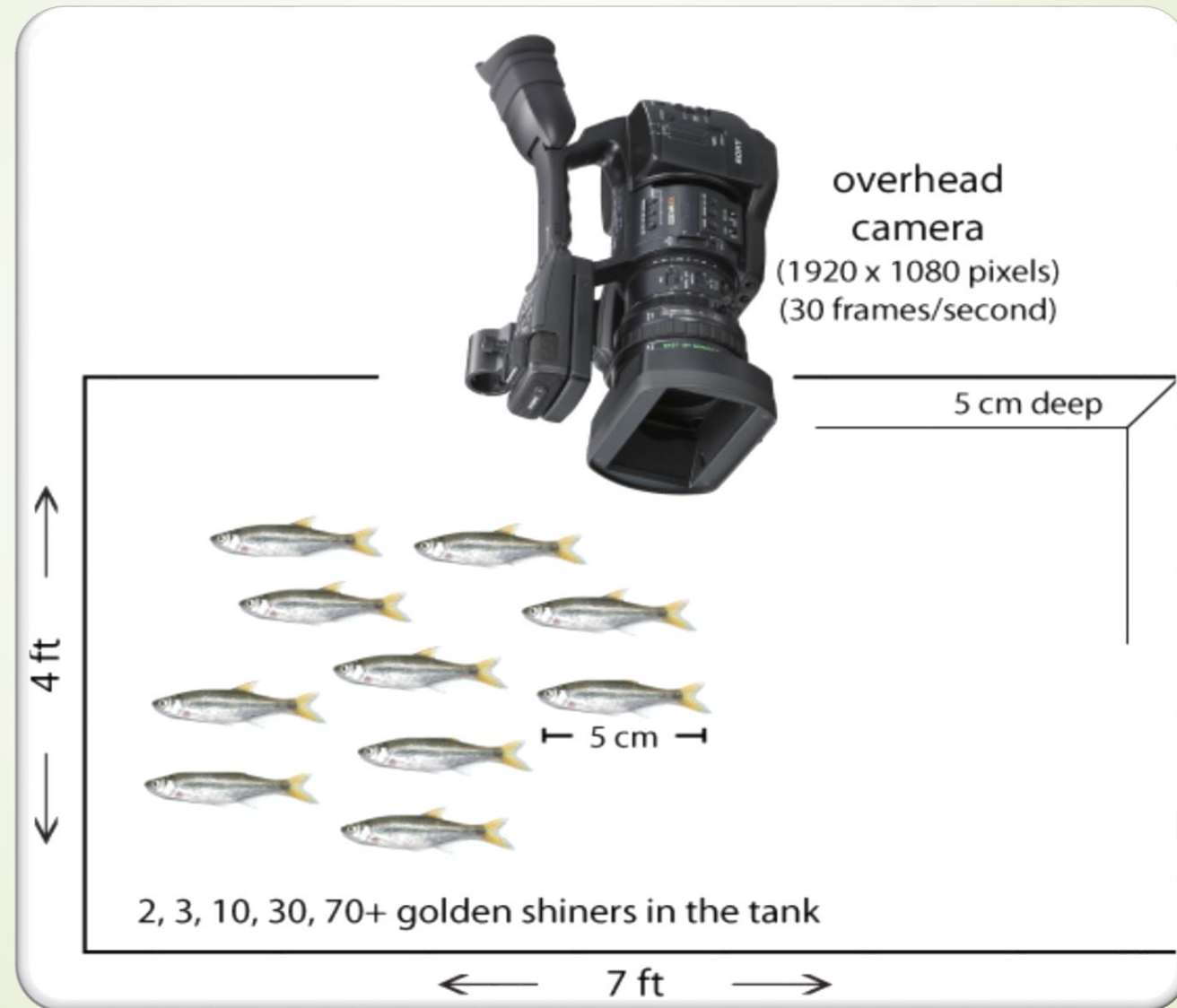


Prof. Christos Ioannou



Prof. Iain Couzin

- Sistema Experimental

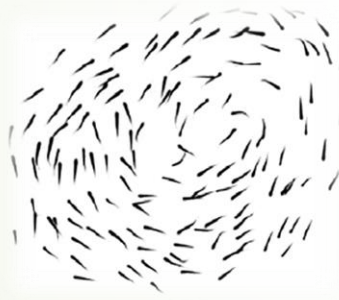


- Dinámica de 1000 peces

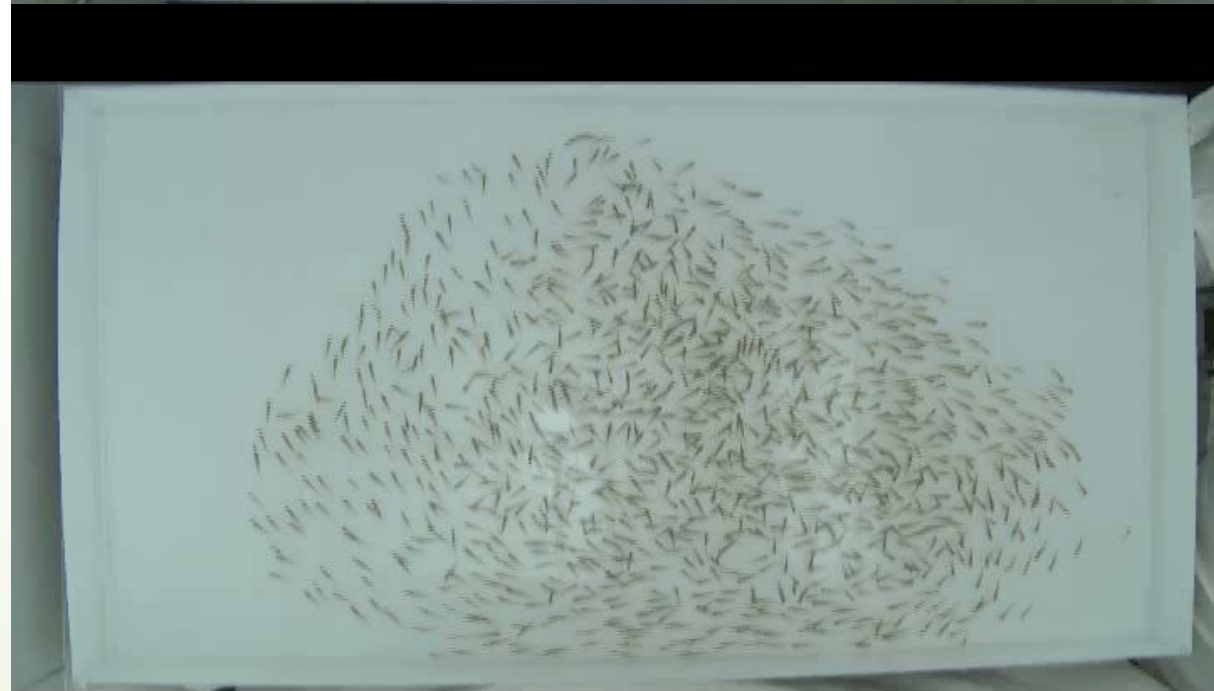
Estado polarizado



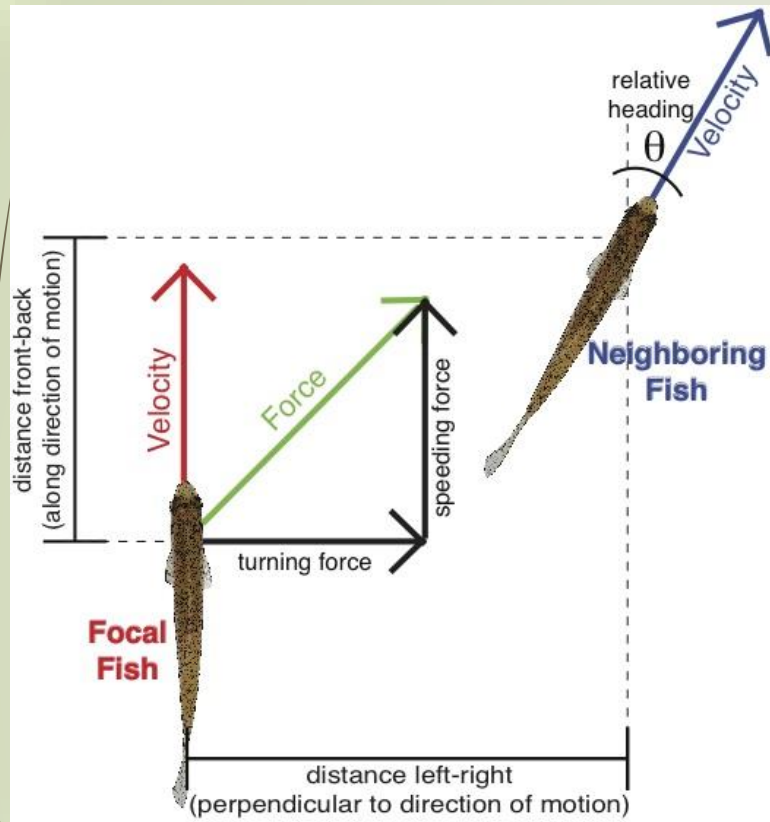
Estado rotacional



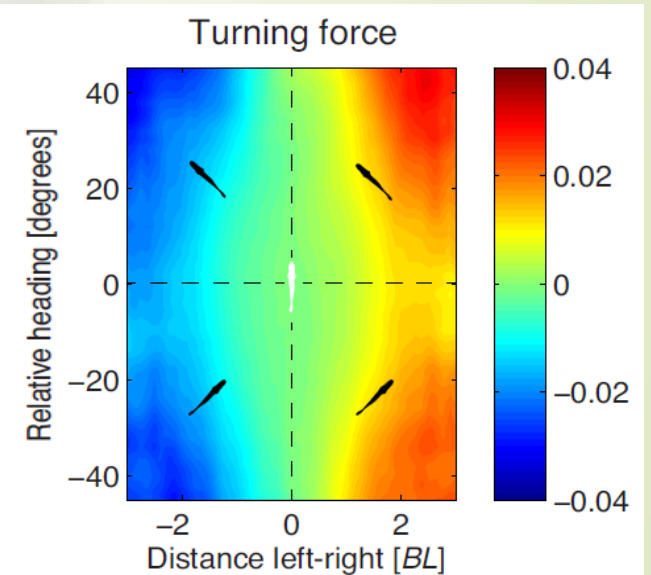
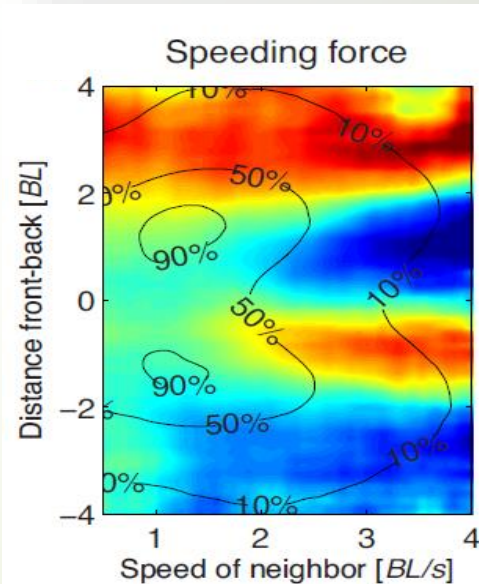
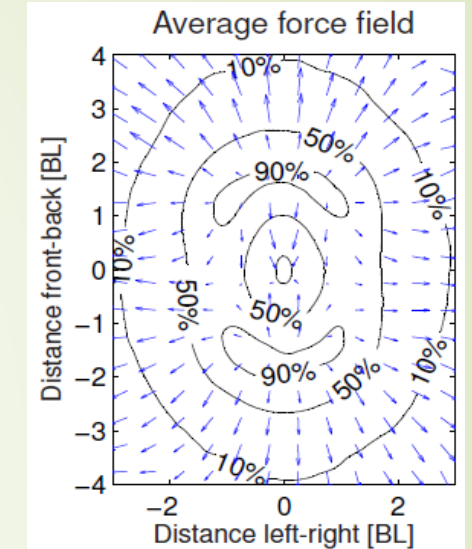
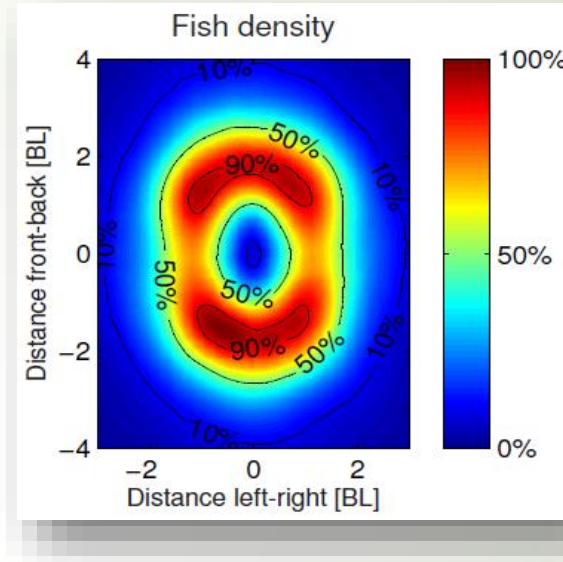
Estado de enjambre




Resultados: La interacción a dos cuerpos (entre 2 peces)



- Fuerzas efectivas
 - Medimos *fuerzas efectivas (sociales)* entre peces usando muchos datos





Sobre plagas de langostas, canibalismo y universalidad

El experimento de langostas en Oxford

Universalidad y campo medio

Conexión con las redes complejas

Análisis usando redes adaptativas

<http://www.biond.org/>

- **La herramienta:** Redes adaptativas
 - Redes en que las conexiones cambian en función del estado de los nodos
 - Ejemplo: Me busco otros amigos si no opinan como yo
- **El desafío:**
 - Diseñar un modelo útil de movimiento colectivo usando redes adaptativas
- **Los actores:**



Dr. Gerd Zschaler



Dr. Anne-Ly Do

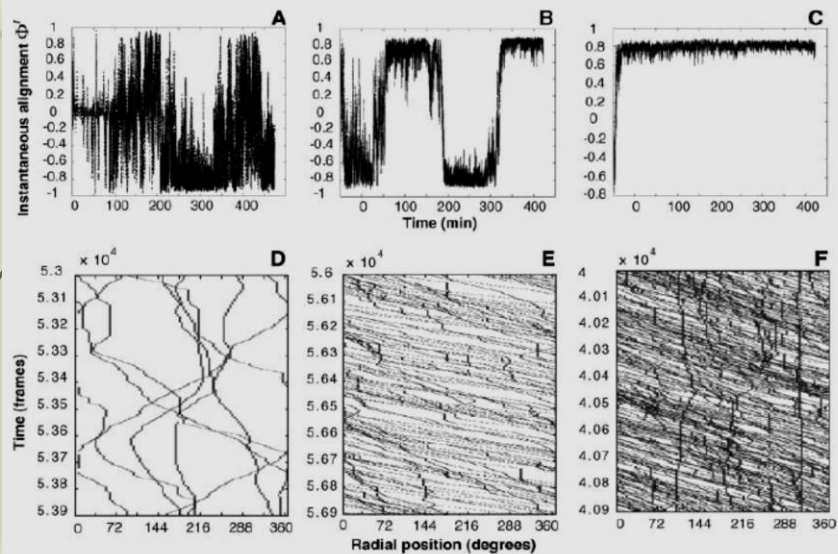


Prof. Thilo Gross

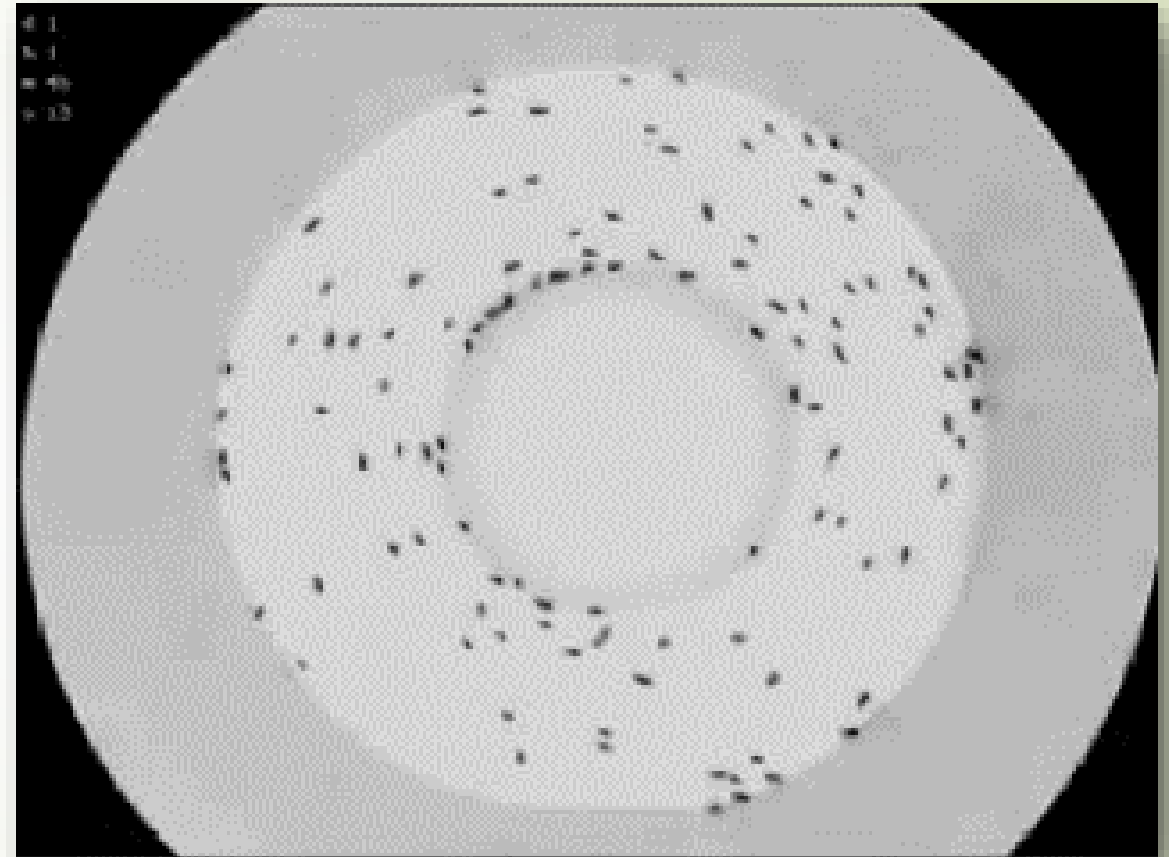
El experimento de Oxford

From Disorder to Order in Marching Locusts

J. Buhl,^{1,2*} D. J. T. Sumpter,¹ I. D. Couzin,^{1,3} J. J. Hale,¹ E. Despland,^{1†}
E. R. Miller,¹ S. J. Simpson^{1,2}



-¿Cuáles son las interacciones reales?
(¿Son equivalentes a alineamiento?)



- Necesitamos un enfoque más universal y genérico

– Solución de *campo medio*

- ❑ Considerar dos poblaciones diferentes que van a la *izquierda (L)* y a la *derecha (R)*:

$$R + L = 1$$

- ❑ Ecuación de la *tasa de conversión*:

$$\begin{aligned} d_t L &= q R - q L + w_2 L R - w_2 R L + w_3 L^2 R - w_3 R^2 L \\ &= q(R - L) + w_3(L^2 R - R^2 L) \end{aligned}$$

- ❑ Soluciones *estacionarias*

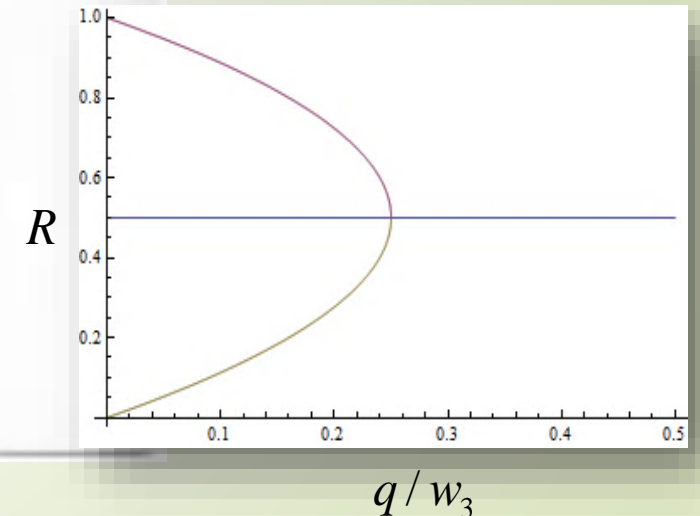
- Estado desordenado:

$$L = R = \frac{1}{2}$$

- Estado ordenado (para bajo ruido o alta densidad):

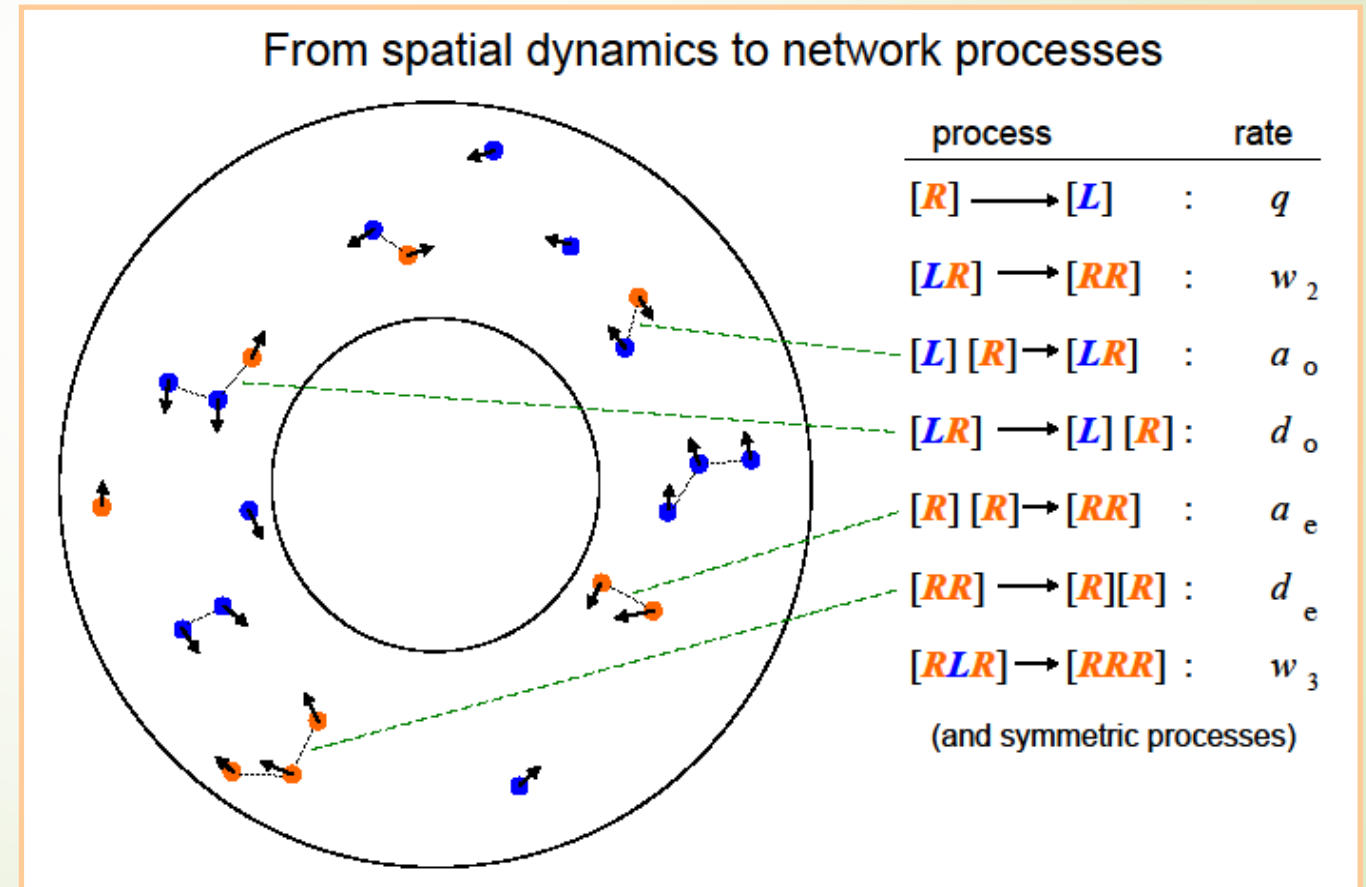
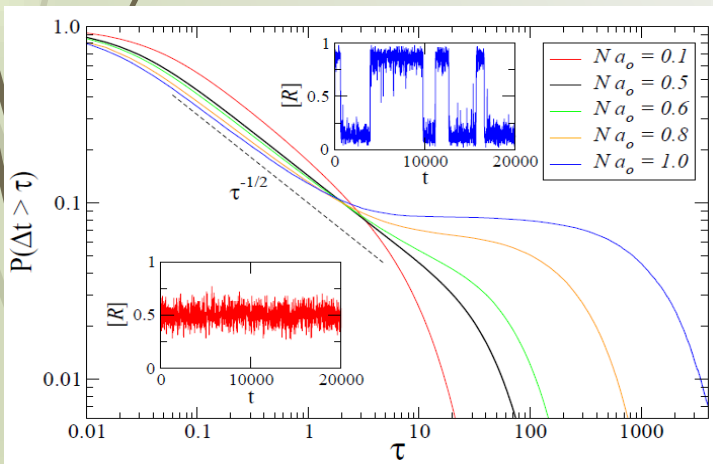
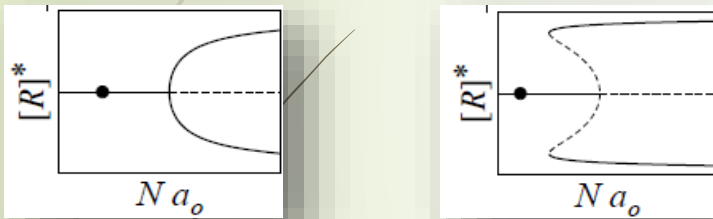
$$0 = q(R - L) + w_3 L R (L - R)$$

$$\Rightarrow \frac{q}{w_3} = L R \Rightarrow R = \frac{1}{2} \pm \sqrt{\frac{1}{4} - \frac{q}{w_3}}$$



Análisis usando redes adaptativas

- **Redes adaptativas:** Co-evolucionan tanto los estados como las conexiones de la red
- En el contexto de **Movimiento Colectivo:**
 - Estado de un nodo \Leftrightarrow dirección de movimiento de un agente
 - Conexiones entre nodos \Leftrightarrow interacción de cualquier tipo





Ejemplos de materia activa

Enjambres robóticos

Fluidos de bacterias

Organismos en desarrollo

Redes de actina miosina

Ejemplos físicos



Fin

...de la segunda sesión del taller