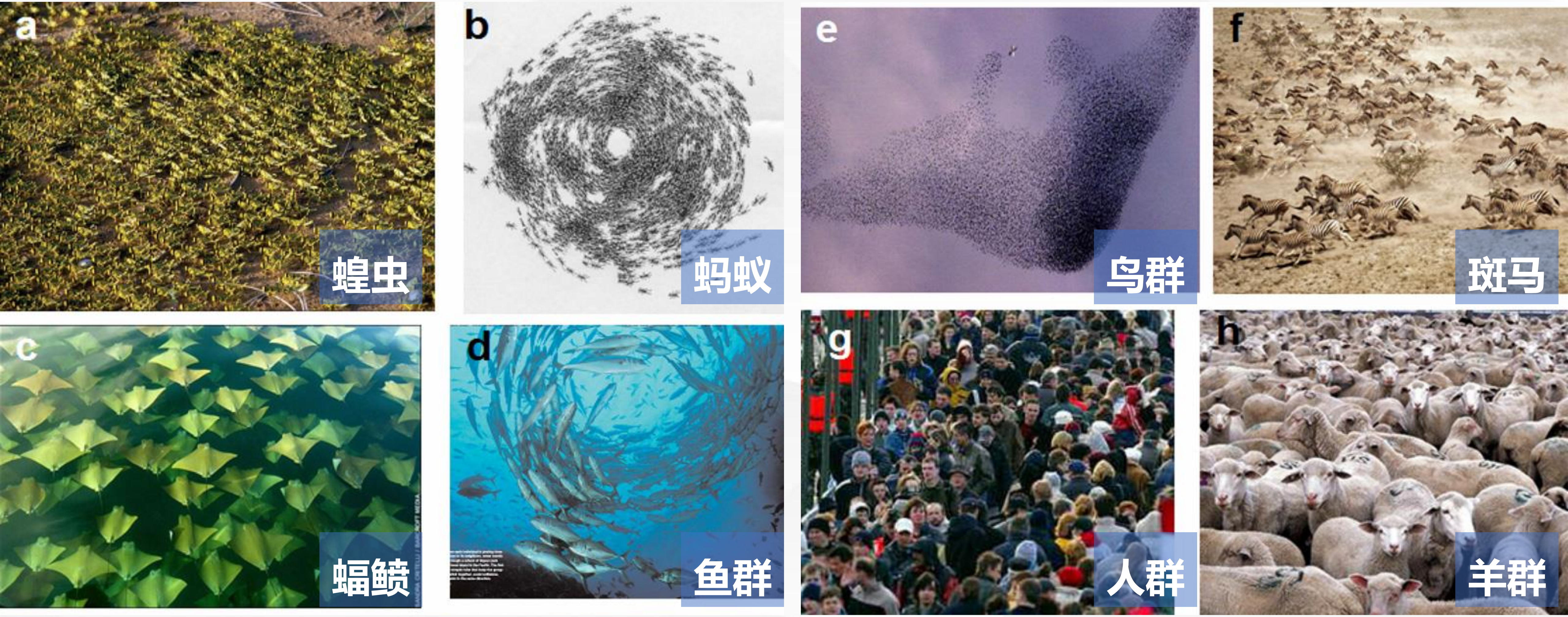
之江实验室 ZHEJIANG LAB

鸟群信息传递的涌现过程

张骥 之江实验室

2021年11月16日



Vicsek, Tamás, and Anna Zafeiris. "Collective motion." Physics reports 517.3-4 (2012): 71-140.

赶路

吃草

去中心，相互影响，远离平衡态

之江实验室 ZHEJIANG LAB

Istituto dei Sistemi Complessi **Institute for Complex Systems**

Andrea Cavagna

Leonardo Parisi

Stefania Melillo

Massimiliano Viale

Giorgio Parisi

Sapienza Università di Roma

Sapienza University of Rome

椋鸟

Cavagna, Andrea, et al. "Scale-free correlations in starling flocks." Proceedings of the National Academy of Sciences 107.26 (2010): 11865-11870.

报告要点

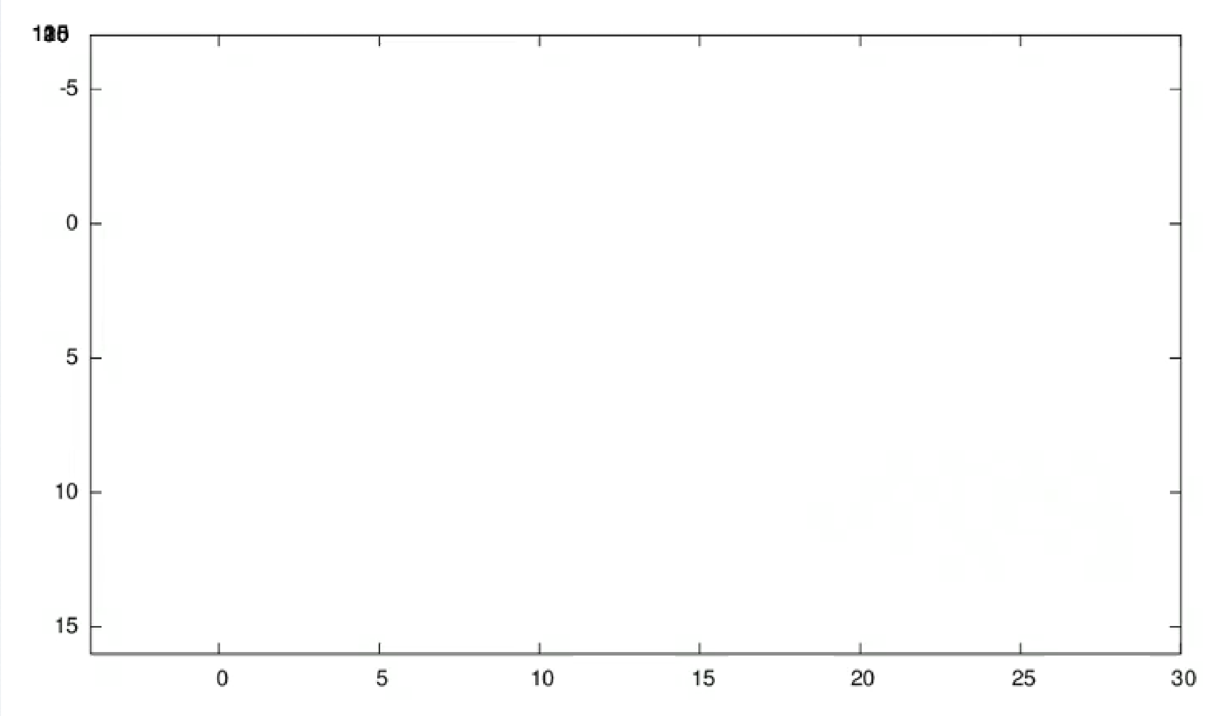
- 短期行为：同一鸟群任意两只鸟鸟运动都会有相互影响。
  - 鸟群没有特征尺度
  - Cavagna, Andrea, et al. "Scale-free correlations in starling flocks." Proceedings of the National Academy of Sciences 107.26 (2010): 11865-11870.
- 长期行为：鸟群内信息扩散速度是常数。
  - 鸟群信息传递是反常扩散现象
  - Attanasi, Alessandro, et al. "Information transfer and behavioural inertia in starling flocks." Nature physics 10.9 (2014): 691-696.

同一群体的鸟运动有相互影响

- 影响：速度相关性
- 同一鸟群存在相互影响
  - 现象和群体大小无关
  - 现象和鸟的位置无关
- 不同鸟群没有影响

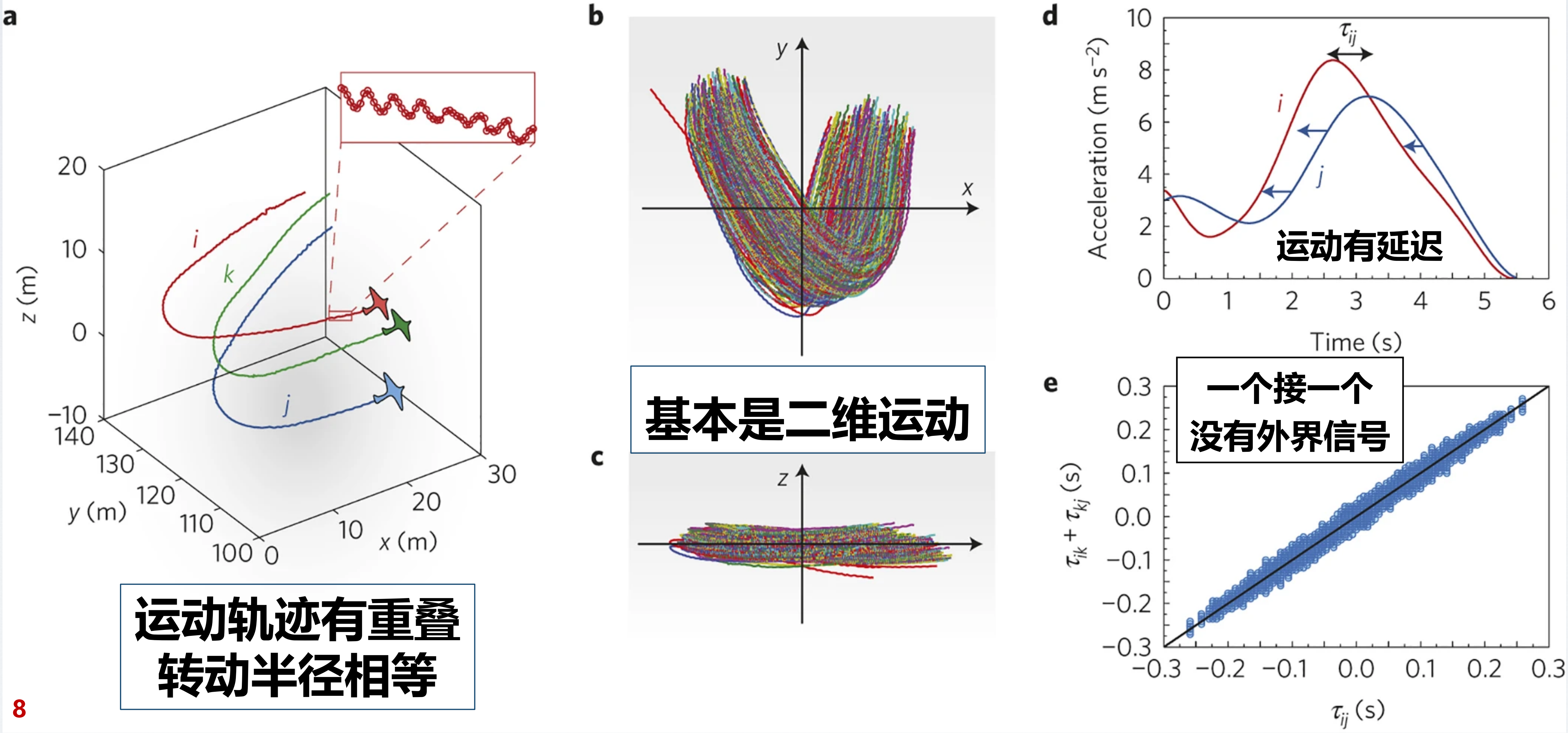
Cavagna, Andrea, et al. "Scale-free correlations in starling flocks." Proceedings of the National Academy of Sciences 107.26 (2010): 11865-11870.

三维轨迹重建



Attanasi, Alessandro, et al. "Information transfer and behavioural inertia in starling flocks." Nature physics 10.9 (2014): 691-696.

三维轨迹重建和运动延迟

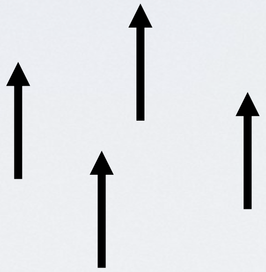


运动轨迹有重叠
转动半径相等

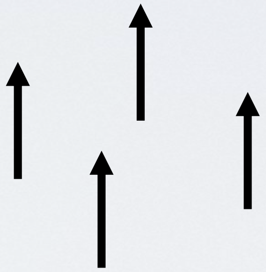
基本是二维运动

一个接一个
没有外界信号

鸟群的转动半径相等

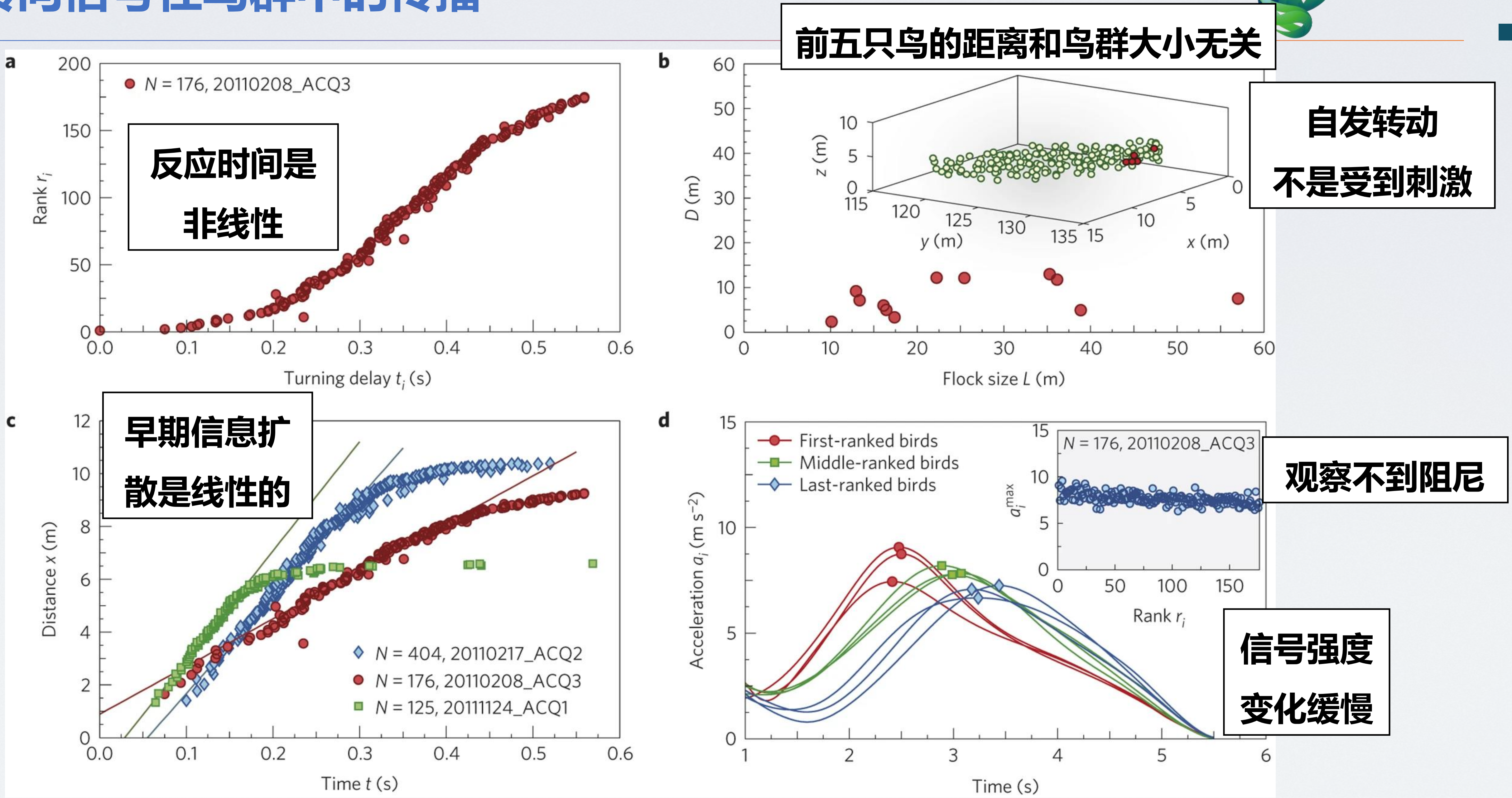


刚体转动



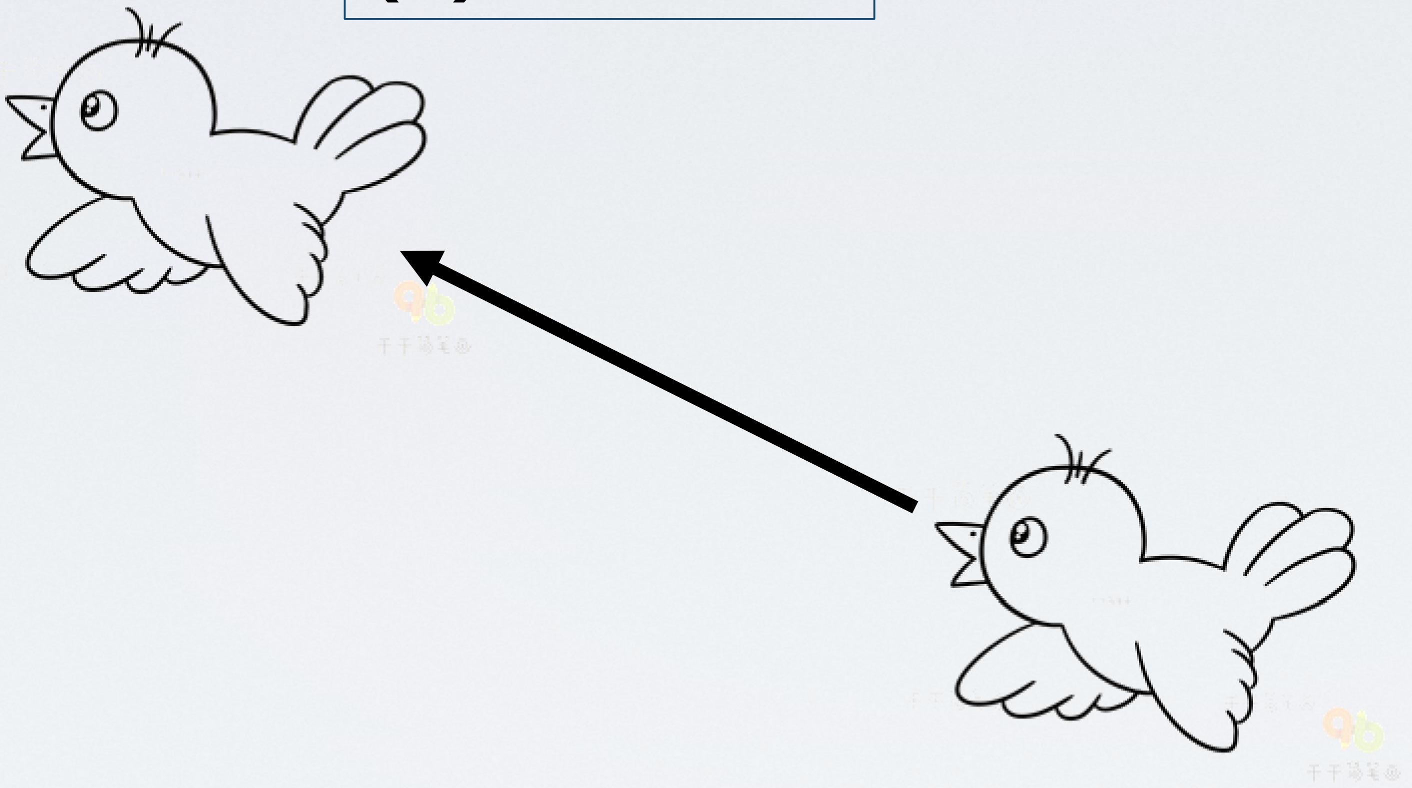
个体转动

转向信号在鸟群中的传播

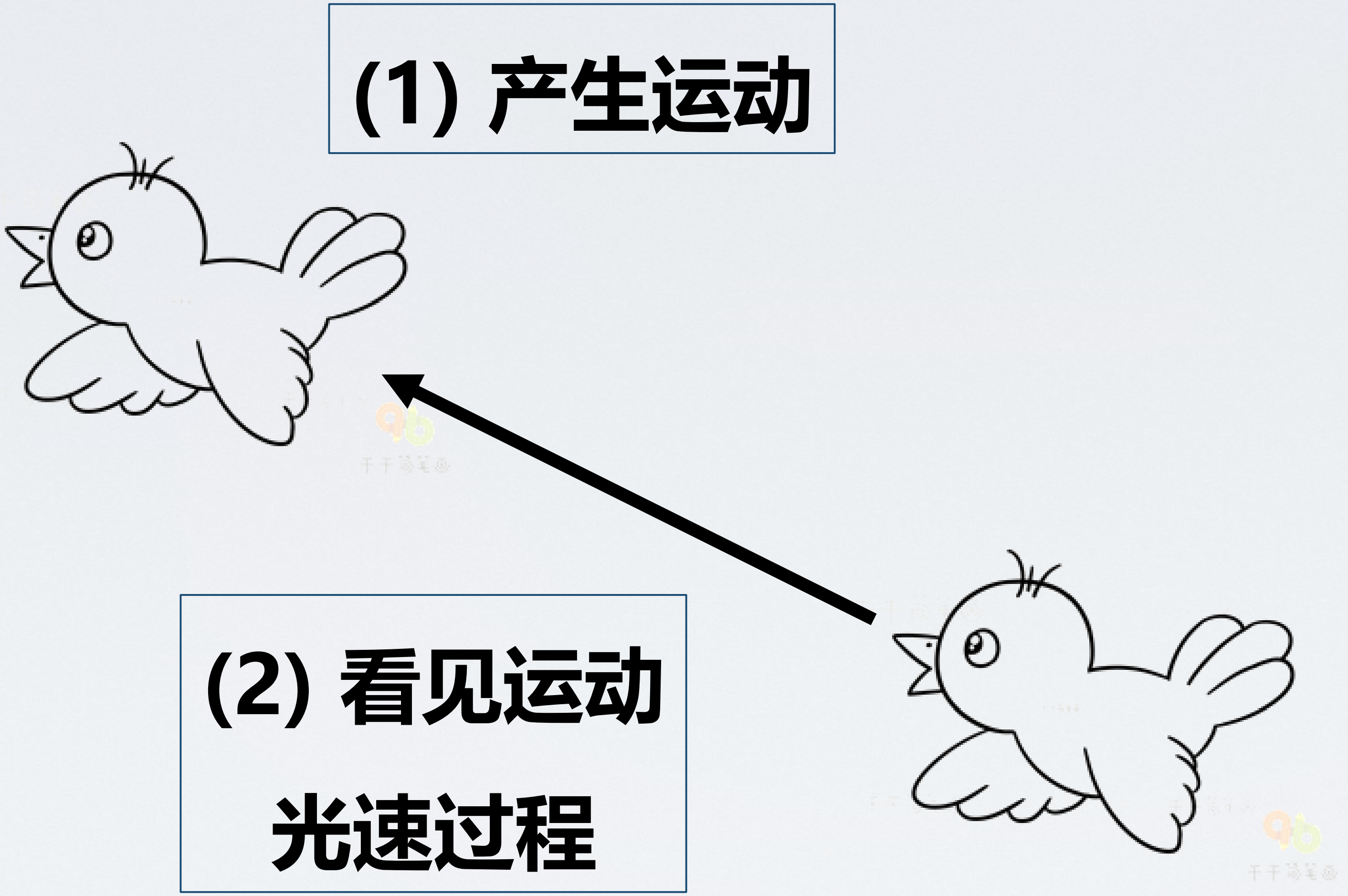


猜测：鸟群的涌现过程

(1) 产生运动

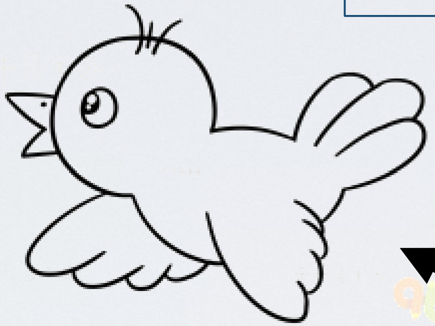


猜测：鸟群的涌现过程



猜测：鸟群的涌现过程

(1) 产生运动

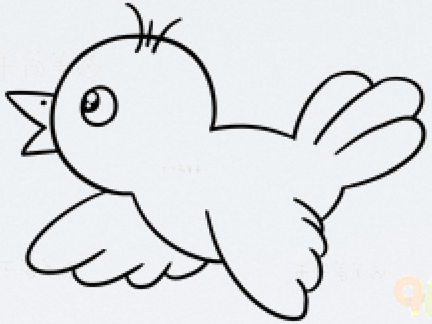


(3) 思考一下

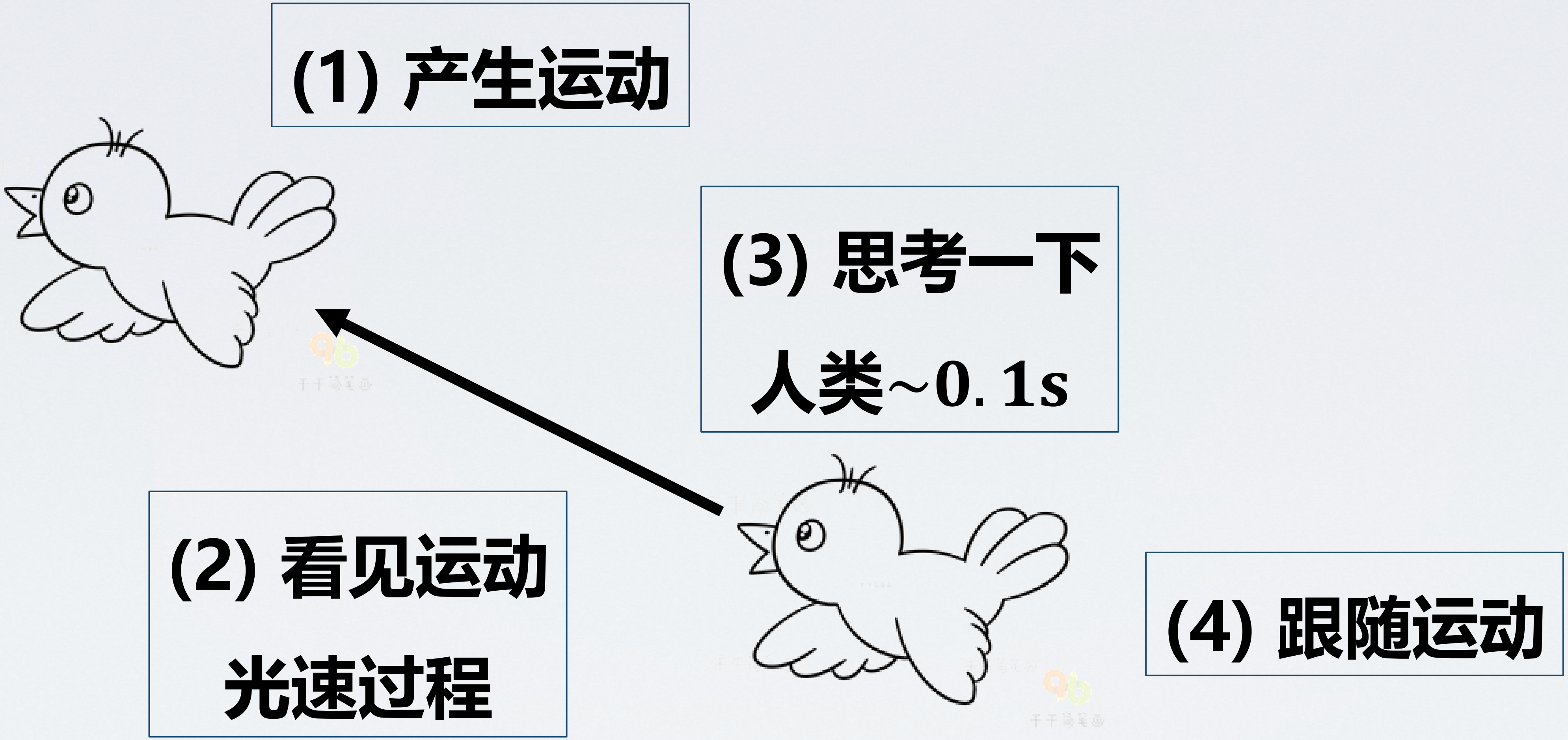
人类~0.1s

(2) 看见运动

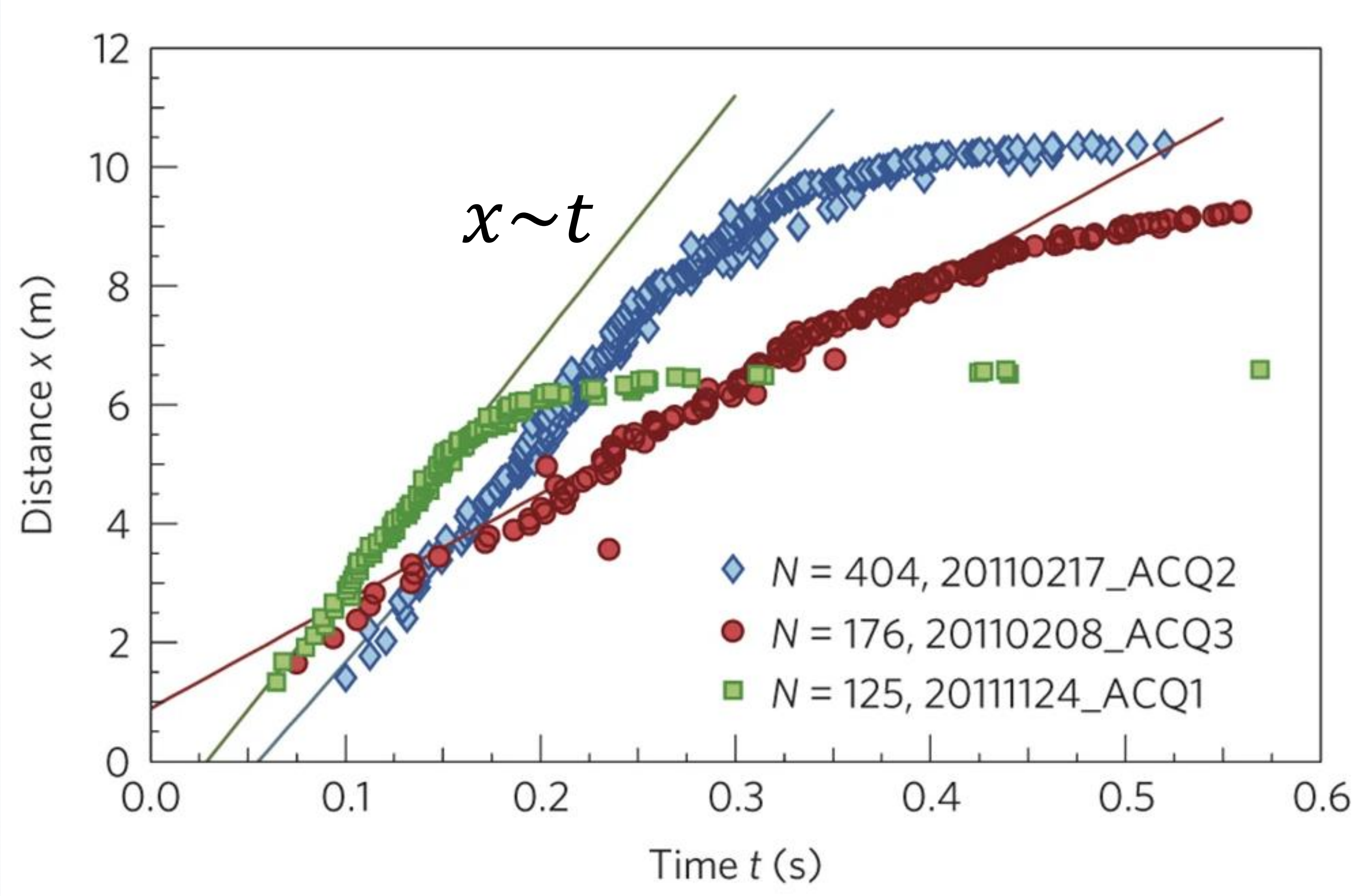
光速过程



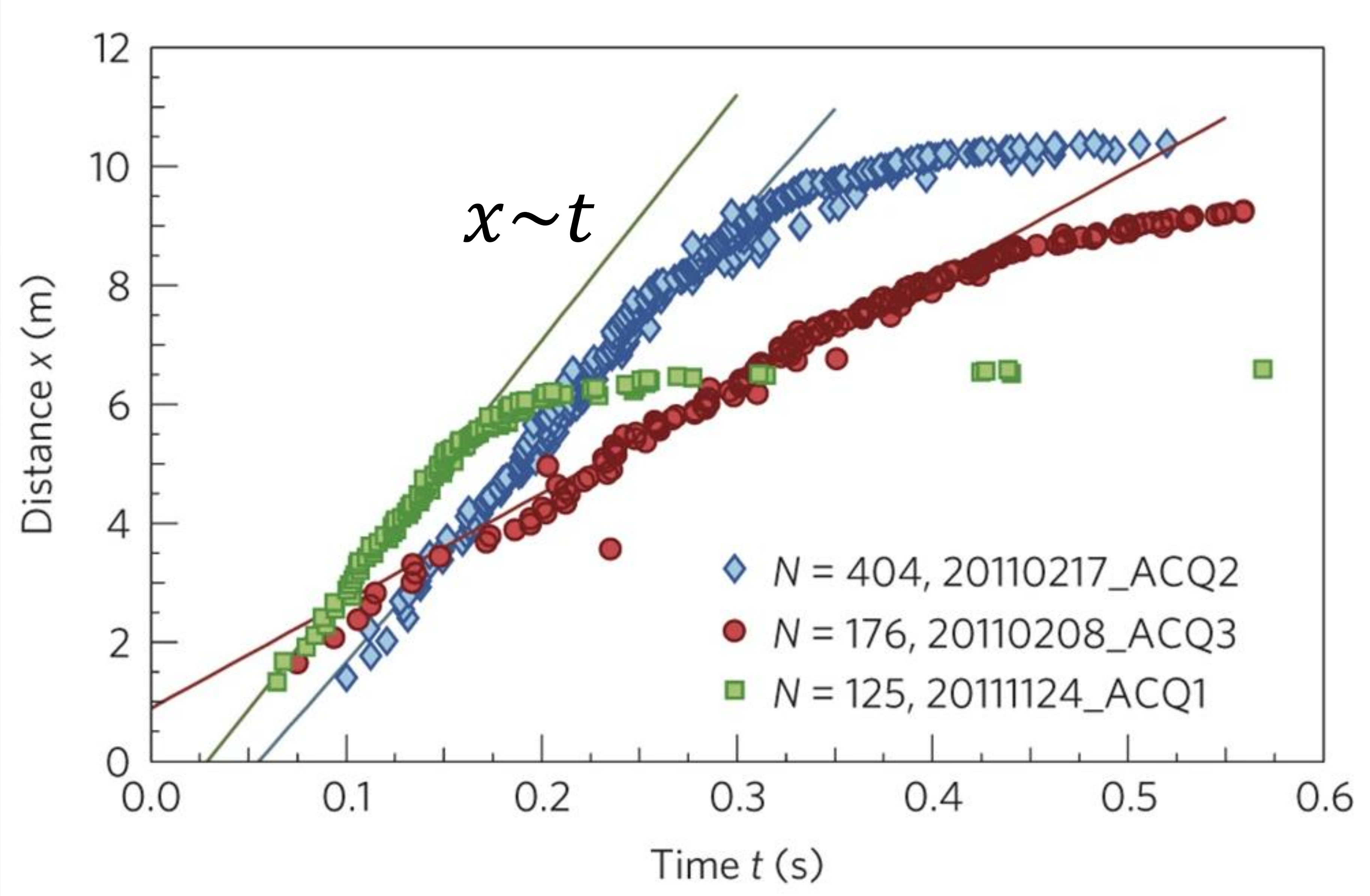
猜测：鸟群的涌现过程



早期信息扩散速度是线性的，$x{\sim}t$



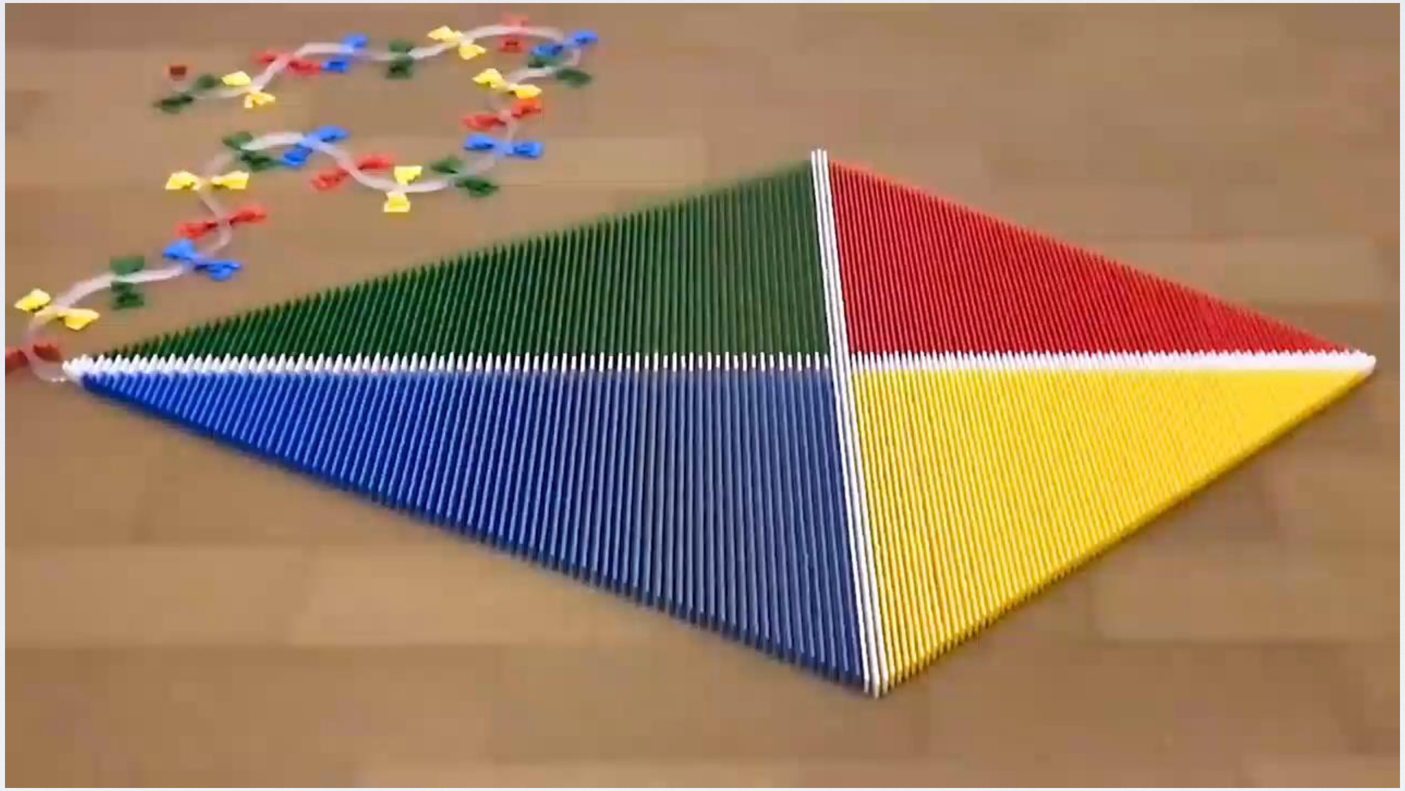
早期信息扩散速度是线性的，$x{\sim}t$



- 距离 $= \left(\frac{\text{编号}}{\text{密度}}\right)^{1/3}$
  - 距离：长度
  - 编号：无量纲
  - 密度：$1/\text{长度}^3$

Why $1/3$?

信息扩散速度是线性的，不是吹气球：$x{\sim}t^{1/3}$



骨牌变多，倒塌速度不变

$x{\sim}t$

气球变大，吹的更慢

$x{\sim}t^{1/3}$

信息扩散速度是线性的，不是普通扩散：$x \sim t^{1/2}$

之江实验室 ZHEJIANG LAB

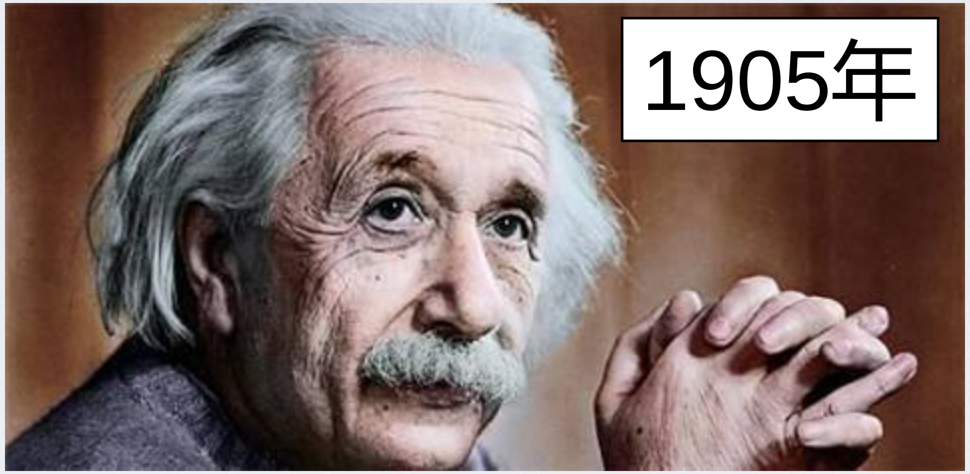
- 分子的无规则运动：

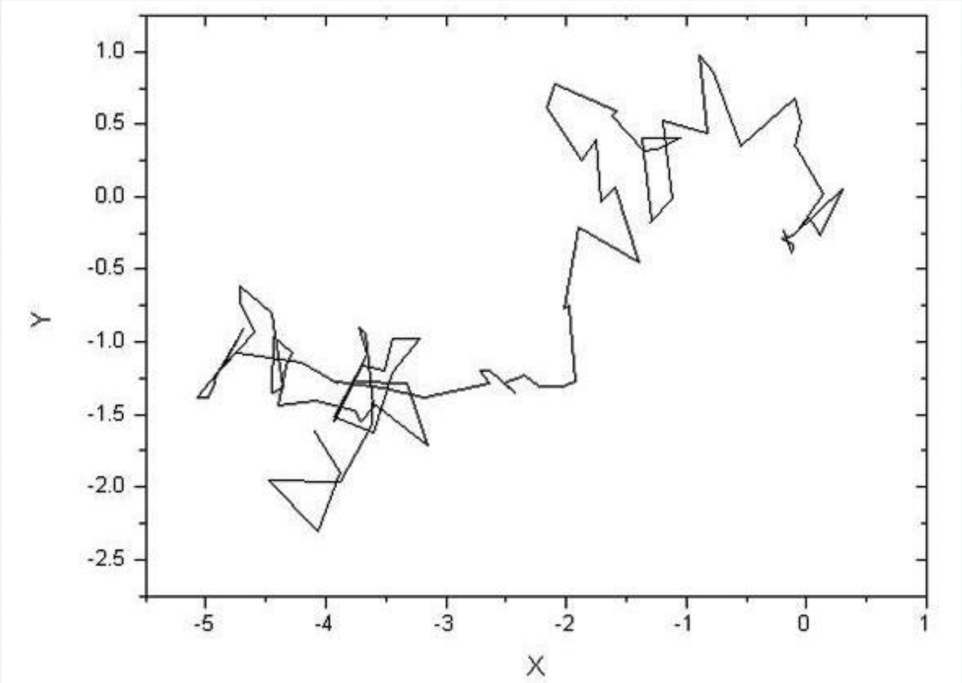
$$\Delta x \sim N(0,1)$$

$$x = \sum_t \Delta x \sim N(0,t)$$

$$= \sqrt{t}N(0,1) = \Delta x\sqrt{t}$$

- 反常扩散：不满足$x \sim t^{1/2}$





经典模型无法描述信息线性扩散

- $\frac{\partial \mathbf{v}_i}{\partial t} = J \sum_j \mathbf{v}_j$
- $\mathbf{v}_i = \mathrm{e}^{i\varphi_i}$
- $\frac{\partial \varphi_i}{\partial t} = \frac{\partial \varphi_i}{\partial \mathbf{v}_i} \frac{\partial \mathbf{v}_i}{\partial t}$

速度变化量 = 周围速度影响

J：**周围影响强度，**

假设单位速度。

鸟群的转动无需引入哈密顿量即可描述。

参见 Cavagna, Andrea, Irene Giardina, and Tomás S. Grigera. "The physics of flocking: Correlation as a compass from experiments to theory." *Physics Reports* 728 (2018): 1-62.

经典模型无法描述信息线性扩散

- $\frac{\partial \mathbf{v}_i}{\partial t} = J \sum_j \mathbf{v}_j$
- $\mathbf{v}_i = \mathrm{e}^{i\varphi_i}$
- $\frac{\partial \varphi_i}{\partial t} = \frac{\partial \varphi_i}{\partial \mathbf{v}_i} \frac{\partial \mathbf{v}_i}{\partial t}$

速度变化量 = 周围速度影响

J：**周围影响强度，**

假设单位速度。

鸟群的转动无需引入哈密顿量即可描述。

Why Hamiltonian?

通过对称性建立了个体和整体的关系

经典模型无法描述信息线性扩散

$$\mathbf{v}_i(t+1) = \mathbf{v}_i(t) + J\sum_{j\in i}\mathbf{v}_j(t)$$

$$\frac{\mathrm{d}\mathbf{v}_i}{\mathrm{d}t} = -\frac{\partial H}{\partial \mathbf{v}_i}, \quad H = -J\sum_{\langle ij\rangle}\mathbf{v}_i\cdot\mathbf{v}_j$$

$$H = \frac{J}{2}\sum_{\langle ij\rangle}(\varphi_i-\varphi_j)^2 = \frac{1}{2}a^2 J\int\frac{\mathrm{d}^3x}{a^3}\,[\nabla\varphi(x,t)]^2$$

$$\frac{\partial\varphi}{\partial t} = -\frac{\delta H}{\delta\varphi} = a^2 J\,\nabla^2\varphi$$

计算哈密顿量的求和过程
建立了个体和整体的关系

扩散方程， $x \sim t^{1/2}$
与观察不符

经典模型无法描述信息线性扩散

$$\mathbf{v}_i(t+1) = \mathbf{v}_i(t) + J\sum_{j\in i}\mathbf{v}_j(t)$$

$$\frac{\mathrm{d}\mathbf{v}_i}{\mathrm{d}t} = -\frac{\partial H}{\partial \mathbf{v}_i}, \quad H = -J\sum_{\langle ij\rangle}\mathbf{v}_i\cdot\mathbf{v}_j$$

$$H = \frac{J}{2}\sum_{\langle ij\rangle}(\varphi_i-\varphi_j)^2 = \frac{1}{2}a^2J\int\frac{\mathrm{d}^3x}{a^3}\,[\nabla\varphi(x,t)]^2$$

$$\frac{\partial\varphi}{\partial t} = -\frac{\delta H}{\delta\varphi} = a^2J\,\nabla^2\varphi$$

计算哈密顿量的求和过程
建立了个体和整体的关系

扩散方程， $x\sim t^{1/2}$
与观察不符

怎么办？对称性

何为哈密顿量的对称性

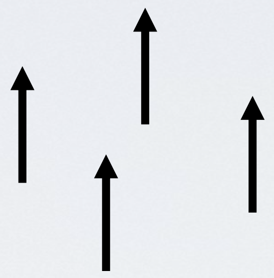
- 牛顿力学： 坐标 + 力
- 拉格朗日力学： 坐标 + 速度
- 哈密顿力学： 坐标 + 动量
  - 哈密顿量： 总能量=总动能+总势能
- 互为对偶示例：
  - 平动： 空间坐标，线动量
  - 转动： 角度坐标，角动量
  - 主动转动： 主动转角，主动动量

改进哈密顿量引入行为惯性

经典Vicsek模型

主动转动

$$H=\int\frac{\mathrm{d}^3x}{a^3}\left\{\frac{1}{2}a^2J\,[\nabla\varphi(x,t)]^2+\frac{s_z^2(x,t)}{2\chi}\right\}$$



$$\frac{\partial^2\varphi}{\partial t^2}-c_s^2\nabla^2\varphi=0,\quad c_s^2=a^2J/\chi$$

信息匀速传播

改进哈密顿量引入行为惯性

$$\boxed{\frac{\partial \varphi_i}{\partial t}} - a^2 J \nabla^2 \varphi = 0$$

一阶导数

阻尼模型

$$\boxed{\frac{\partial^2 \varphi_i}{\partial t^2}} - c_s^2 \nabla^2 \varphi = 0$$

二阶导数

弹簧振子

改进哈密顿量引入行为惯性

之江实验室 ZHEJIANG LAB

$$\boxed{\frac{\partial \varphi_i}{\partial t}} - a^2 J \nabla^2 \varphi = 0$$

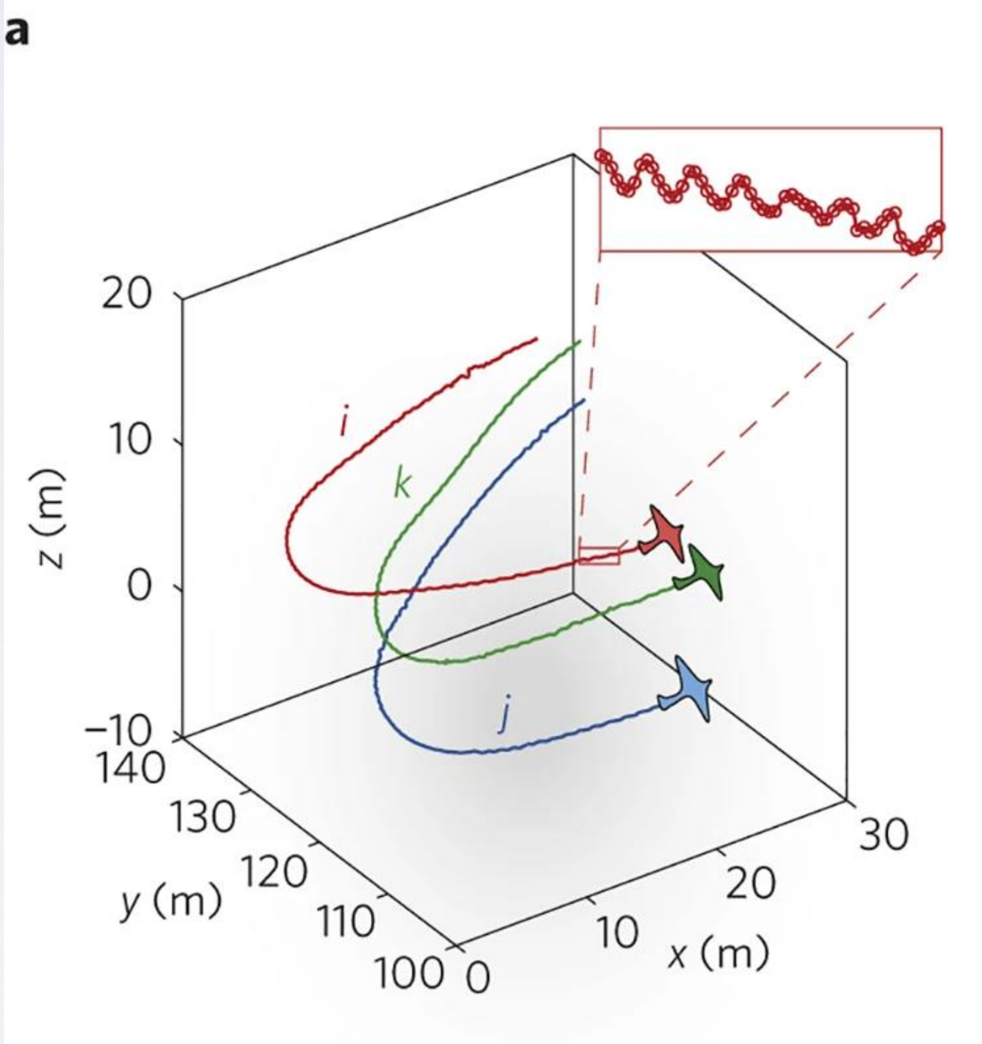
一阶导数

阻尼模型

$$\boxed{\frac{\partial^2 \varphi_i}{\partial t^2}} - c^2 \nabla^2 \varphi = 0$$

二阶导数

弹簧振子



改进哈密顿量引入行为惯性

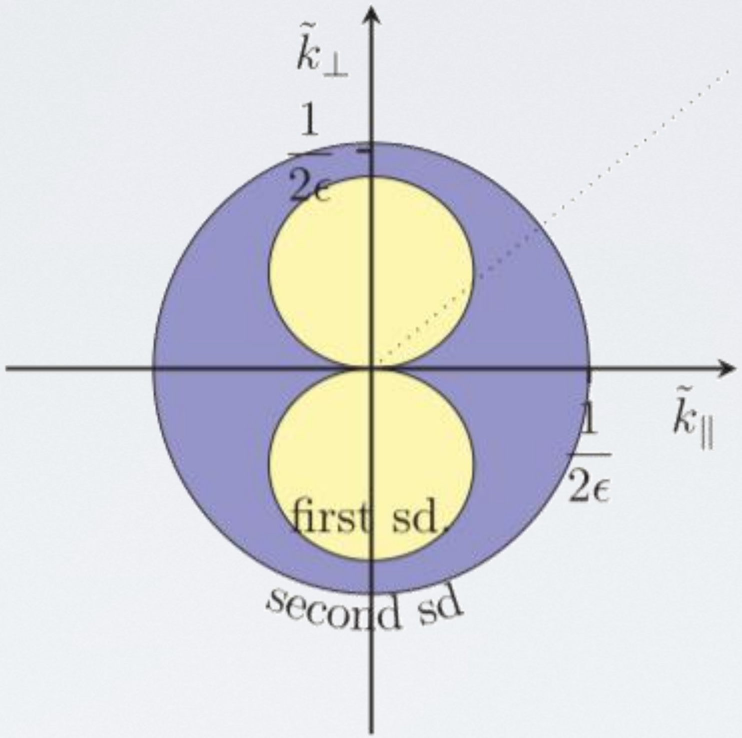
之江实验室 ZHEJIANG LAB

$$\boxed{\frac{\partial \varphi_i}{\partial t}} - a^2 J \nabla^2 \varphi = 0$$

一阶导数
阻尼模型

$$\boxed{\frac{\partial^2 \varphi_i}{\partial t^2}} - c^2 \nabla^2 \varphi = 0$$

二阶导数
弹簧振子

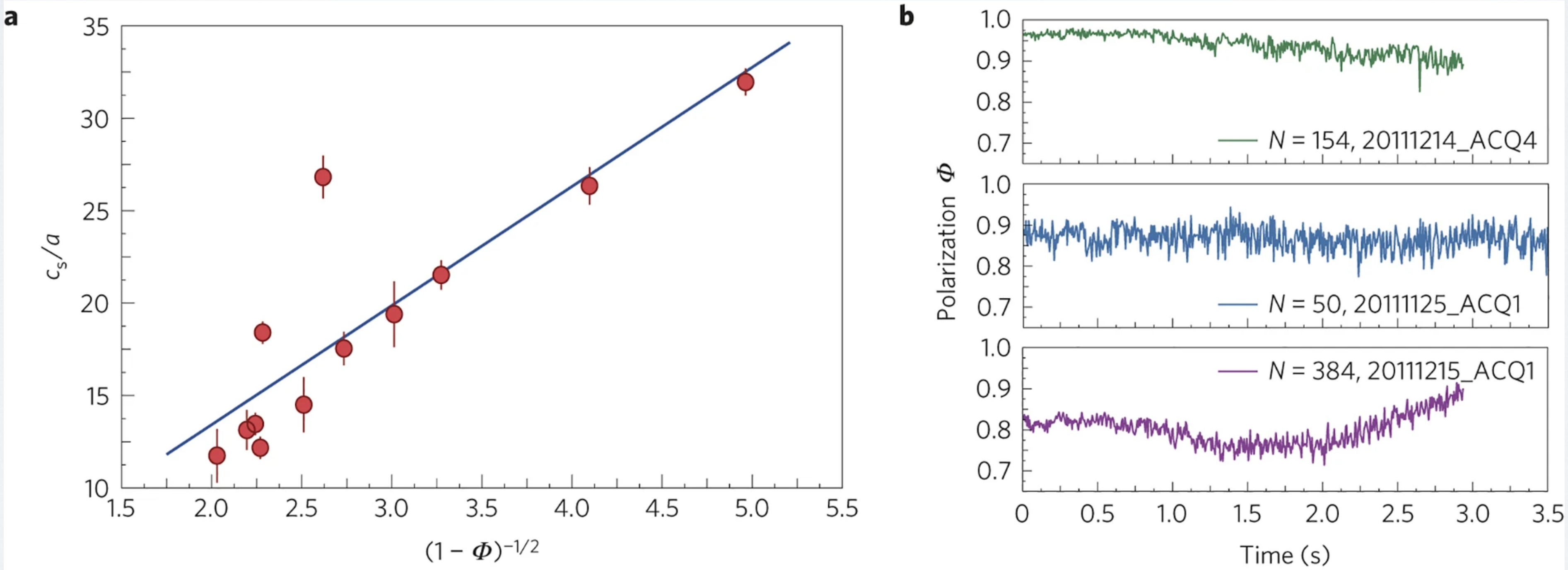


二者结合会怎么样？再发一篇PRL

Cavagna, Andrea, et al. "Silent flocks: constraints on signal propagation across biological groups." *Physical review letters* 114.21 (2015): 218101.

排列整齐鸟群的信息扩散速度更快

- $c_s = a\sqrt{\frac{J}{\chi}} \sim J^{0.5}$: 信息扩散速度 ~ (排列整齐意愿)$^{0.5}$
- $\Phi = 1 - \frac{1}{J}$: 排列整齐的效果 与 意愿
- $\frac{c_s}{a} \sim (1-\Phi)^{-0.5}$: 信息扩散速度 与 排列整齐效果的关系



- 短期行为：同一鸟群任意两只鸟鸟运动都会有相互影响。
  - 鸟群没有特征尺度
  - Cavagna, Andrea, et al. "Scale-free correlations in starling flocks." Proceedings of the National Academy of Sciences 107.26 (2010): 11865-11870.
- 长期行为：鸟群内信息扩散速度是常数。
  - 鸟群信息传递是反常扩散现象
  - Attanasi, Alessandro, et al. "Information transfer and behavioural inertia in starling flocks." Nature physics 10.9 (2014): 691-696.

谢 谢

欢迎加入
之江实验室

我的内推码
NCFP9L