

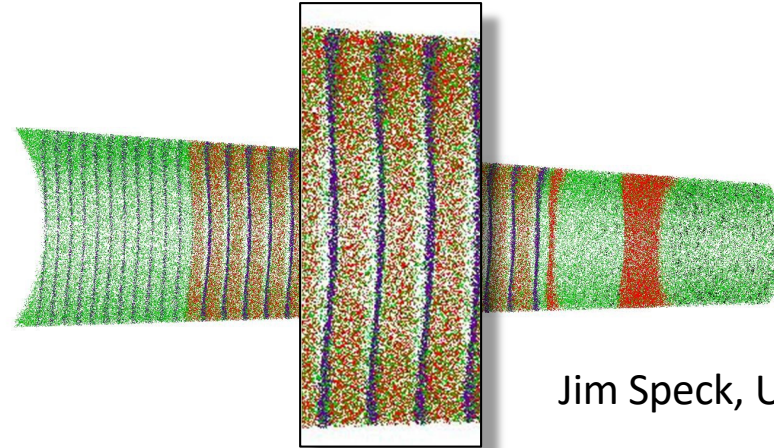
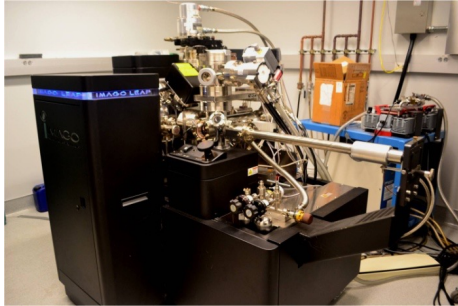
# De la mécanique

# à la physique statistique

<https://moodle.psl.eu/>  
[marcel.filoche@espci.psl.edu](mailto:marcel.filoche@espci.psl.edu)

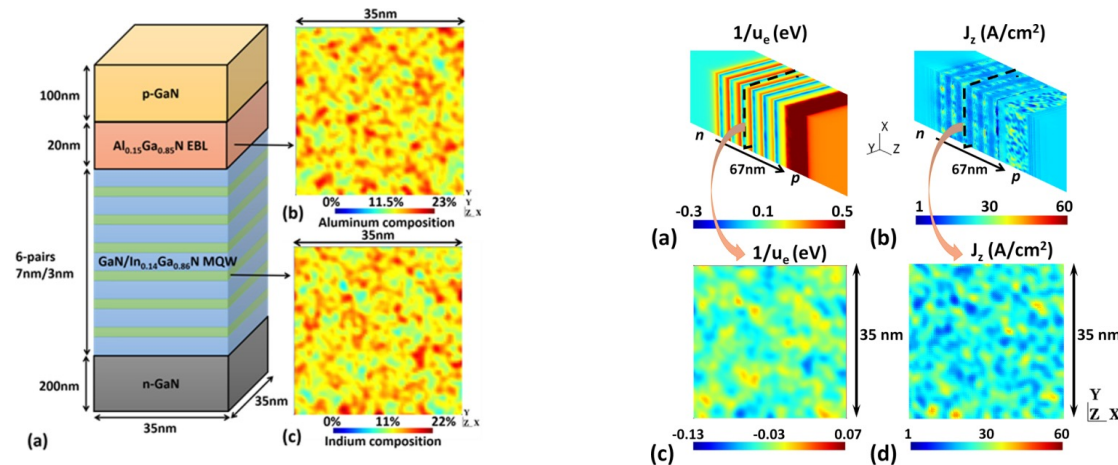
# Les LEDs à semiconducteurs

## Atom Probe Tomography: 60 millions d'atomes



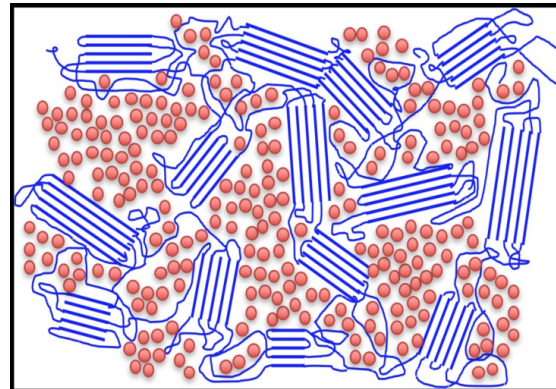
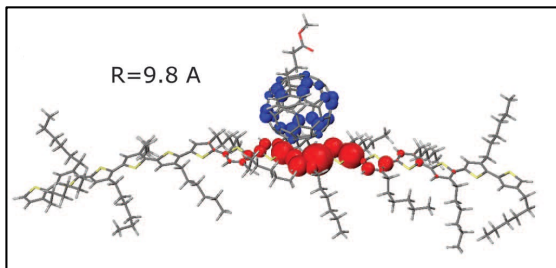
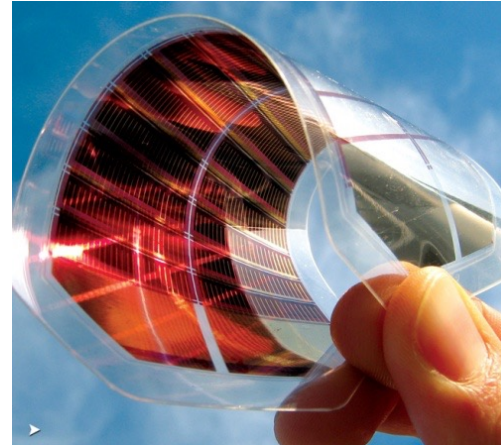
Jim Speck, UCSB

## Structure LED et transport électronique

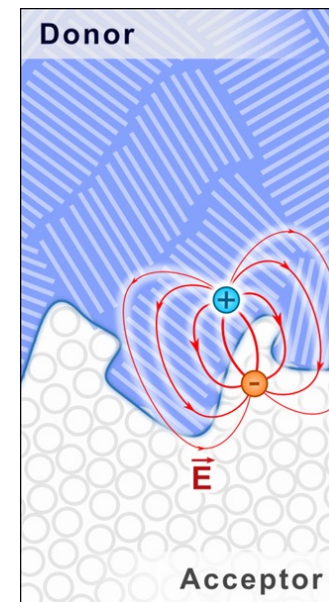


Li et al., *Phys. Rev. B*. 2017

# Semiconducteurs organiques



Interfaces entre molécules de  
type donneur et accepteur



# La physique statistique

- Pourquoi le Soleil a-t-il l'apparence d'un **corps « noir »** ?
- Qu'est-ce que « **l'effet papillon** » ?
- Comment se fait-il qu'on trouve des électrons à 10000 K dans les métaux ?
- Comment Einstein a-t-il démontré que les **atomes** existaient sans les voir ?
- En quoi les modèles mathématiques **financiers** de la bourse ont un rapport avec l'IRM ?
- Que signifie une **température négative** en Kelvin ?
- Depuis quand voit-on à l'autre bout de l'Univers ?
- Quand doit **mourir l'Univers** ?
- Et quantités de réponses à bien d'autres questions...

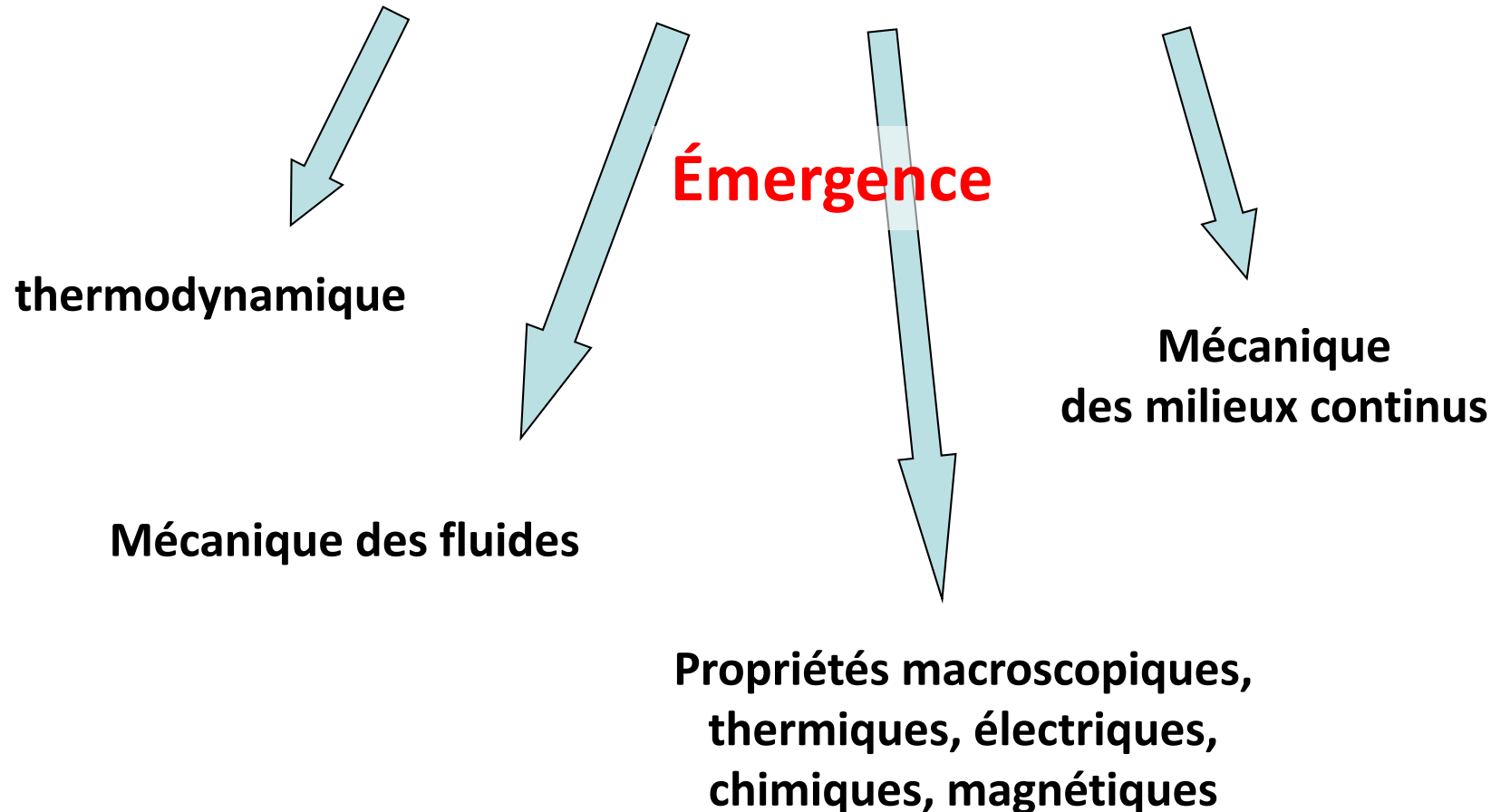
**1, 2, ...,  $10^{23}$  particules**

# La physique statistique

Science qui s'attache à comprendre les propriétés physiques **émergentes** de systèmes composés d'un grand nombre de constituants élémentaires, ou d'un grand nombre de degrés de liberté.

# Rôle de la physique statistique

Physique fondamentale (classique ou quantique),  
électromagnétisme, physique des particules, théorie des champs



# Comment comprendre la matière macroscopique ?

- **Taille des systèmes macroscopiques**
- **Impossibilité d'accéder aux données**
- **Déterminisme / chaos**
- **Réversibilité microscopique / irréversibilité macroscopique**



# Grand nombre de données ?

Distance interatomique typique :

$$1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$$

Pour un échantillon de l'ordre du cm en 3D :

$$N \approx 10^{8 \times 3} = 10^{24} !$$

1 réel = 64 bits = 8 octets

$$6 \text{ réels} \times 10 \times 10^{24} = 10^{14} \text{ To}$$

**$10^4$  To / être humain**



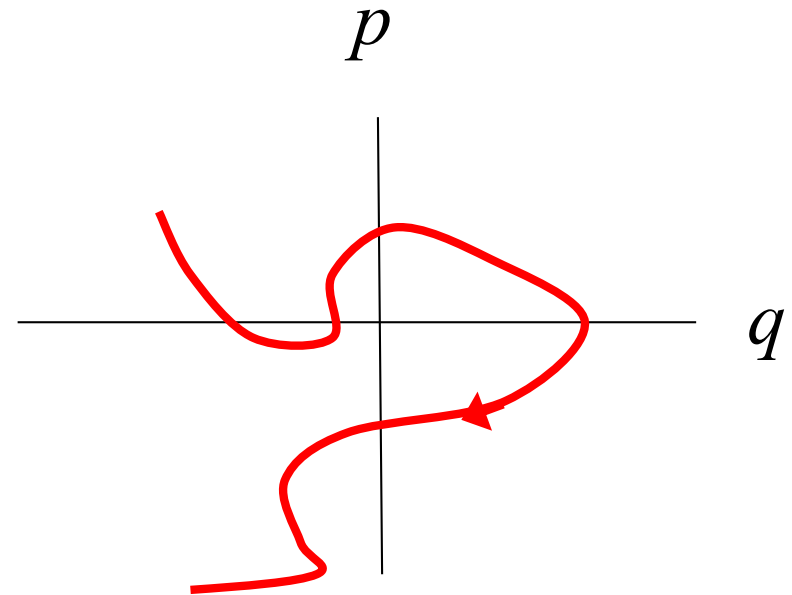
# Les cinq limites

- ➡ Faibles **vitesse**s (devant la vitesse de la lumière)
- ➡ Faible **intensité** des interactions
- ➡ Grandes **distances** (devant les distances inter- ou intra-atomiques)
- ➡ Grands **temps** (devant les temps typiques d'interaction)
- ➡ Grand **nombre** de composants élémentaires (particules)

# Espace des phases

Espace des degrés de liberté  
 $(q,p)$  du système

Pour un système à  $N$  particules,  
l'espace des phases est un espace à  
 $6N$  dimensions !



**Les données de  $(q_i, p_i)$  à un instant  $t$  donné déterminent l'évolution du système pour tous les instants futurs  $t_1 > t$ .**

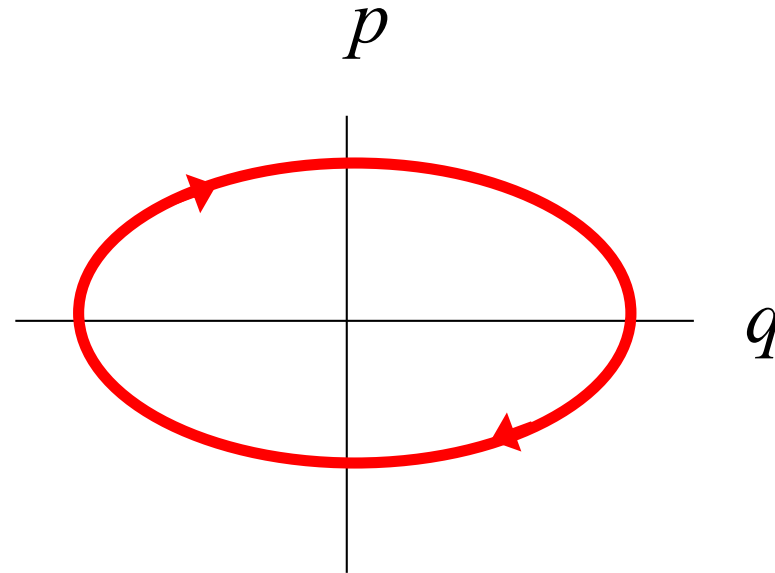
# Trajectoire d'un oscillateur harmonique classique

$$m\ddot{q} = -kq = -m\omega^2 q$$

$$p = m\dot{q}$$

ou encore

$$E = \frac{p^2}{2m} + \frac{1}{2}m\omega^2 q^2$$



- Les trajectoires sont des ellipses fermées
- $E(p,q)$  est une **intégrale isolante** du mouvement

# Déterminisme : le démon de Laplace



Pierre-Simon de Laplace  
(1749-1827)

## ESSAI PHILOSOPHIQUE

### *De la Probabilité.*

Tous les événemens, ceux même qui par leur petitesse, semblent ne pas tenir aux grandes lois de la nature, en sont une suite aussi nécessaire que les révolutions du soleil. Dans l'ignorance des liens qui les unissent au système entier de l'univers, on les a fait dépendre des causes finales, ou du hasard, suivant qu'ils arrivaient et se succédaient avec régularité, ou sans ordre apparent; mais ces causes imaginaires ont été successivement reculées avec les bornes de nos connaissances, et disparaissent entièrement devant la saine philosophie qui ne voit en elles, que l'expression de l'ignorance où nous sommes des véritables causes.

Les événemens actuels ont avec les précédens, une liaison fondée sur le principe évident, qu'une chose ne peut pas commencer d'être, sans une cause qui la produise. Cet axiome connu sous le nom de *principe de la raison suffisante*, s'étend aux actions même

Nous devons donc envisager l'état présent de l'univers, comme l'effet de son état antérieur, et comme la cause de celui qui va suivre. Une intelligence qui pour un instant donné, connaîtrait toutes les forces dont la nature est animée, et la situation respective des êtres qui la composent, si d'ailleurs elle était assez vaste pour soumettre ces données à l'analyse, embrasserait dans la même formule, les mouvemens des plus grands corps de l'univers et ceux du plus léger atome : rien ne serait incertain pour elle, et l'avenir comme le passé, serait présent à ses yeux. L'esprit humain offre dans la perfection qu'il a su donner à l'astronomie, une faible esquisse

*Essai philosophique sur les probabilités, 1814*

# Déterminisme : le problème à trois corps



Henri Poincaré  
(1854 – 1912)

« ...il peut arriver que de petites différences dans les conditions initiales en engendrent de très grandes dans les phénomènes finaux ; une petite erreur sur les premières produirait une erreur énorme sur les derniers. La prédiction devient impossible et nous avons le phénomène fortuit. »

*Calcul des probabilités, 1896*

*Les méthodes nouvelles de la mécanique céleste (1899)*

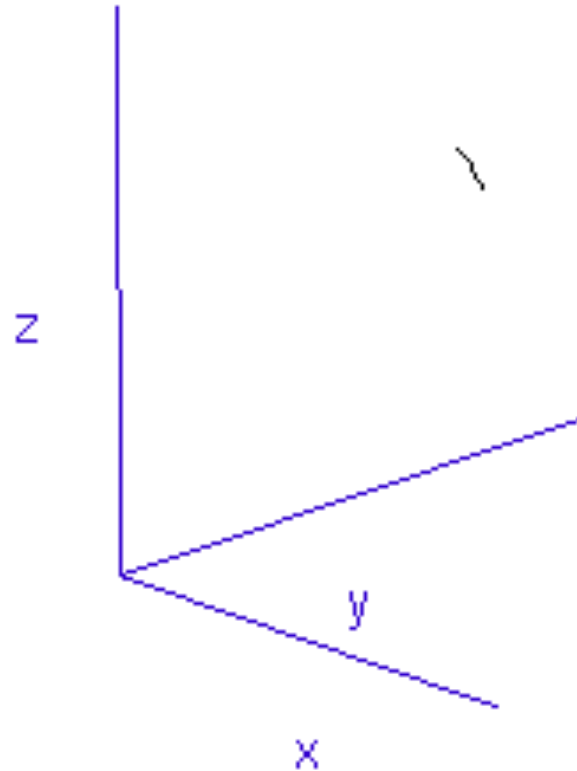
**Sensibilité aux conditions initiales**

# Attracteur de Lorenz



Edward Lorenz  
(1917-2008)

$$\sigma = 10, r = 28, b = 8/3$$



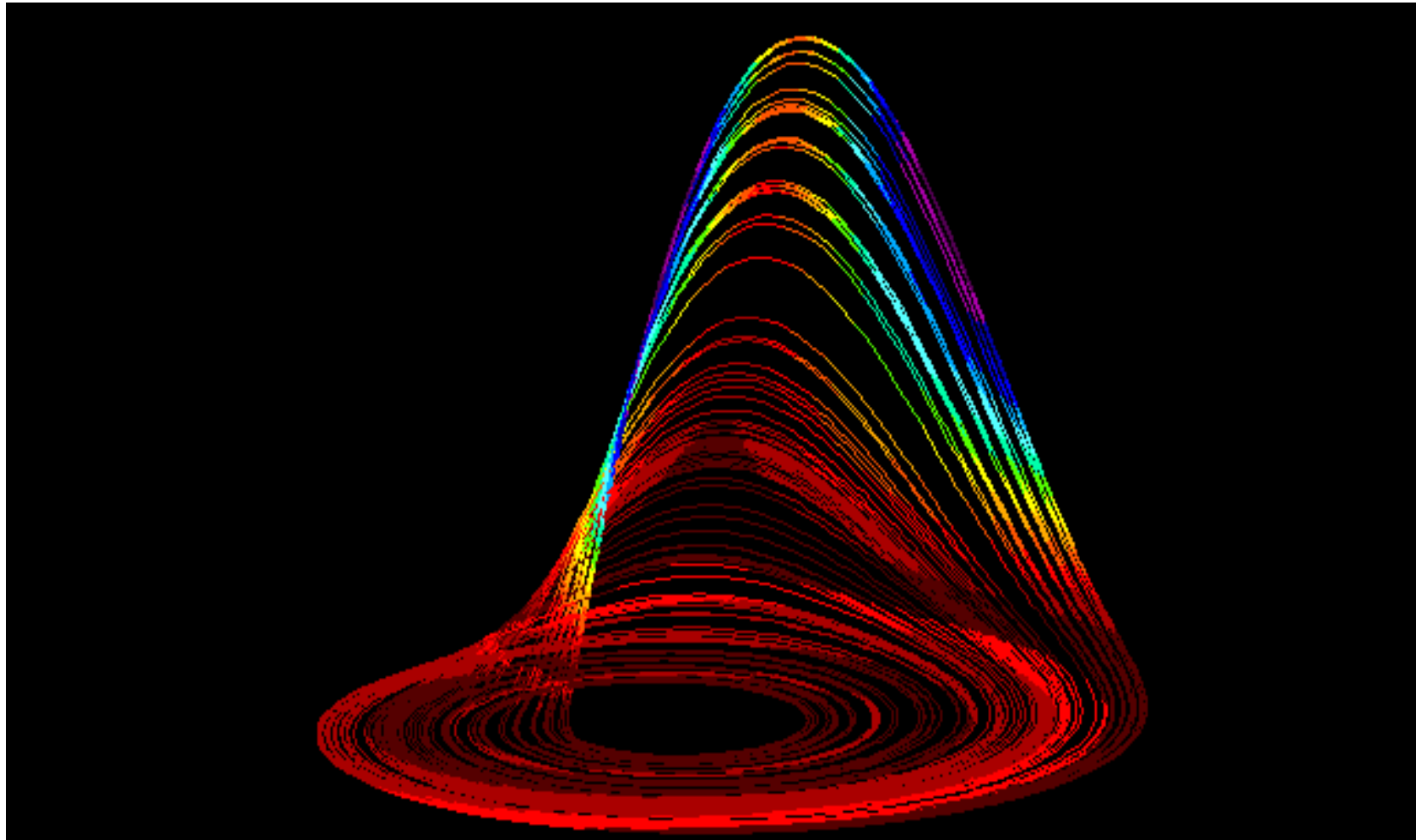
$$\begin{cases} \dot{x} = \sigma(y - x) \\ \dot{y} = rx - y - xz \\ \dot{z} = xy - bz \end{cases}$$

# Le chaos déterministe



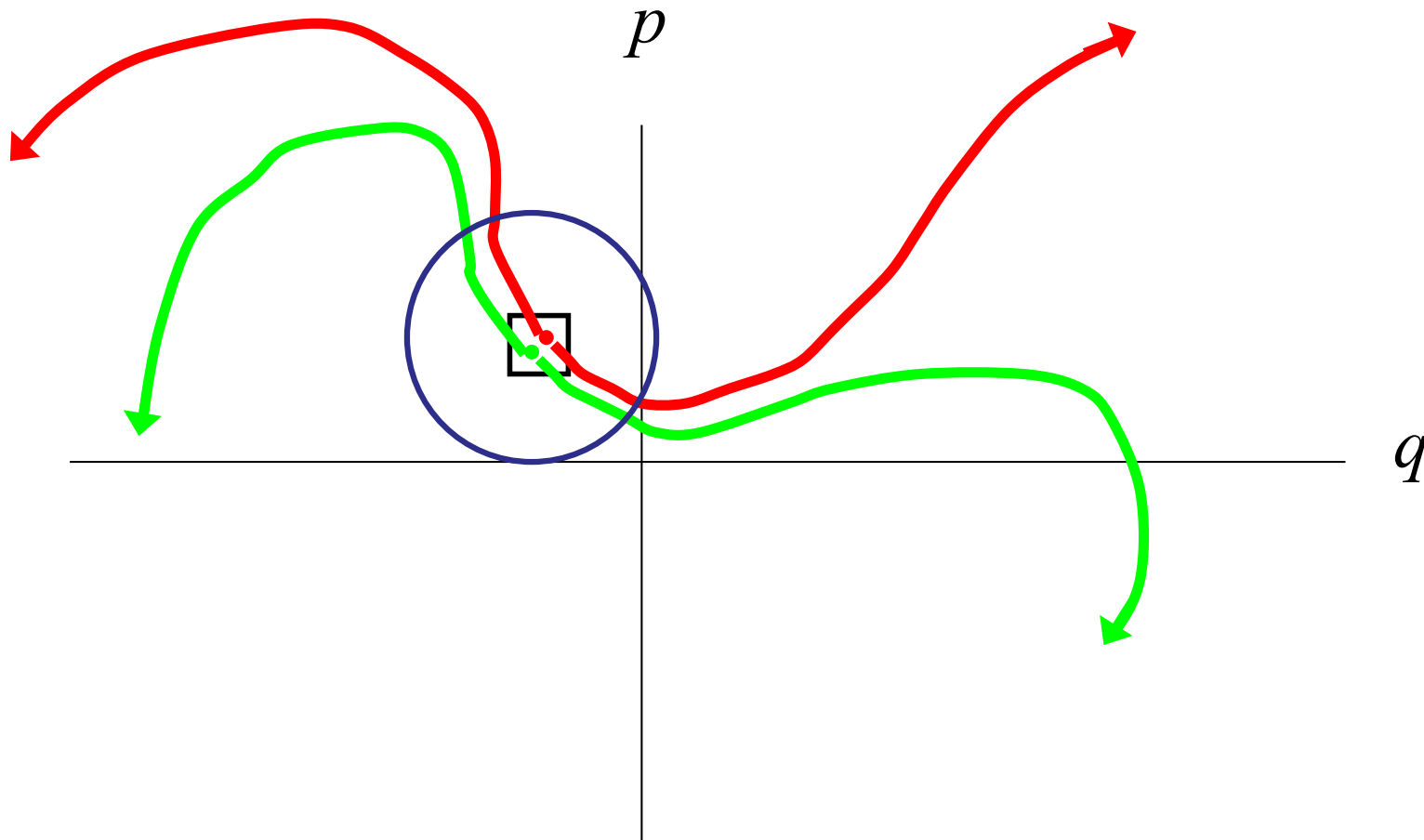


# Le chaos déterministe



Attracteur de Rössler

# Chaos bidirectionnel



# Théorème de récurrence de Poincaré

Soit  $X$  un espace muni d'une mesure finie  $\mu$  et d'une fonction mesurable  $\Phi$  préservant la mesure, c'est-à-dire telle que

$$\forall A \subset X, \quad \mu(\Phi(A)) = \mu(A)$$

Un point  $x \in A$  est dit récurrent par rapport à  $A$  si et seulement si

$$\forall n \in \mathbb{N}, \exists p \geq n, \quad \Phi^p(x) \in A$$

Soit  $A \subset X$  un sous-ensemble mesurable pour la mesure  $\mu$ . Alors, *presque tous* les points  $x \in A$  sont récurrents par rapport à  $A$ .

# Théorème de récurrence de Poincaré

Tout système classique (fini) finit toujours par « revenir » à un état proche de son état initial (même si ce n'est pas exactement le même état).

**! Mais** cela se produit au bout d'une durée plus ou moins longue. L'échelle de durée peut être de l'ordre de **milliards d'années** pour des systèmes de quelques **dizaines** de particules !!!!

Et donc pour des objets macroscopiques....

# L'origine de l'irréversibilité ?

Équations de la dynamique Newtonienne :  $m \ddot{\vec{r}} = \sum_i \vec{F}_i$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial q}{\partial t} = \frac{\partial H}{\partial p} \\ \frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{\partial H}{\partial q} \end{array} \right. \quad H(p, q) = \frac{p^2}{2m} + \sum_i V_i(q)$$

Renversement du temps :  $t \rightarrow -t$  ,  $\vec{p} \rightarrow -\vec{p}$  ,  $\vec{B} \rightarrow -\vec{B}$

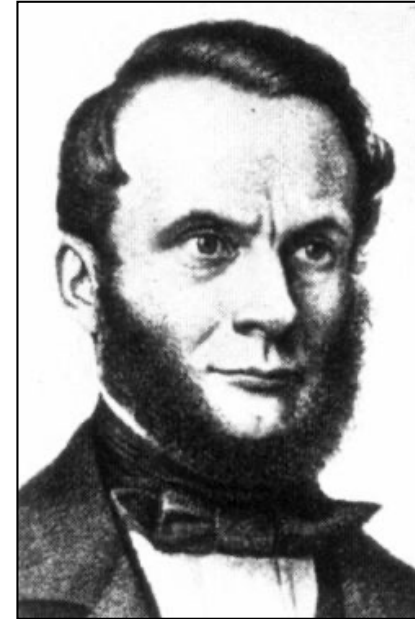
La physique fondamentale (mécanique newtonienne, quantique, électromagnétisme,) est **symétrique** par renversement du temps

# L'irréversibilité en physique



Sadi Carnot  
(1796 – 1832)

*« Il est impossible de produire de la puissance motrice à moins qu'on ne dispose à la fois d'un corps froid et d'un corps chaud. »*



Rudolf Clausius  
(1822 – 1888)

*« L'entropie de l'univers tend vers un maximum. »*

# Accroissement du « désordre » contre organisation croissante



Rudolf Clausius  
(1822–1888)

*« L'entropie de l'univers  
tend vers un maximum. »*



Charles Darwin  
(1809-1882)

*« L'évolution sélectionne les êtres  
les mieux adaptés. »*

# Evolution irréversible : vers la complexité ?





# Licence d'usage dans un contexte public, sans modification

La licence confère à l'utilisateur un droit d'usage sur le document consulté ou téléchargé, totalement ou en partie, dans les conditions définies ci-après et à l'exclusion expresse de toute utilisation commerciale.

Le droit d'usage défini par la licence autorise un usage à destination de tout public qui comprend :

- Le droit de reproduire tout ou partie du document sur support informatique ou papier,
- Le droit de diffuser tout ou partie du document au public sur support papier ou informatique, y compris par la mise à la disposition du public sur un réseau numérique.

Aucune modification du document dans son contenu, sa forme ou sa présentation n'est autorisée. Les mentions relatives à la source du document et/ou à son auteur doivent être conservées dans leur intégralité.

Le droit d'usage défini par la licence est personnel, non exclusif et non transmissible. Tout autre usage que ceux prévus par la licence est soumis à autorisation préalable et expresse de l'auteur.

