Chapitre 1 – Introduction

Le périmètre de la physique statistique

Christophe Texier

Laboratoire de Physique Théorique et Modèles Statistiques

université PARIS-SACLAY

24 janvier 2024

Objectifs du chapitre 1 :

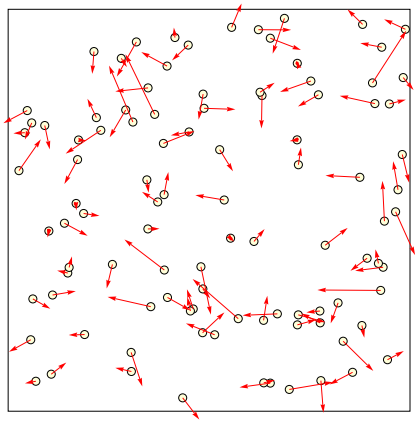
Répondre aux questions :

- À quoi sert la physique statistique ?
- Quelle est la place de la physique statistique parmi les grandes théories fondamentales de la physique ?
- Comment procède-t-elle ? Quels outils/concepts ?

La physique statistique s'intéresse aux systèmes **complexes**, mettant en jeu un très **grand nombre** de degrés de liberté.

Exemple : un gaz

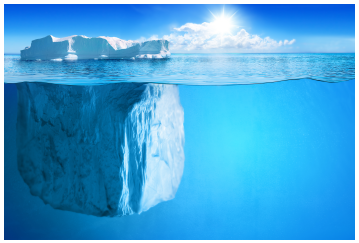
$N \sim 10^{23}$ atomes



description *classique* :

N positions & N impulsions

$\Rightarrow 6N$ degrés de liberté



liquide, solide,...

ferromagnétique,...

etc... TRÈS DIVERS !

Plan

1. Du mAcroscopique au mIcroscopique : les limites de l'approche réductionniste
2. La physique statistique : du mIcroscopique au mAcroscopique
3. Émergentisme

Plan

1. Du mAcroscopique au mIcroscopique : les limites de l'approche réductionniste
2. La physique statistique : du mIcroscopique au mAcroscopique
3. Émergentisme
   - Changement de perspective
   - Illustration : le théorème de la limite centrale

Positivisme *versus* réductionnisme

- Approche **positiviste**, plus phénoménologique ; ce qui n'est pas directement observable est non pertinent

  $\rightarrow$ Ernst Mach (1838-1916)

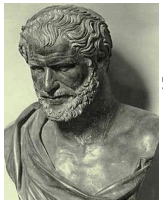
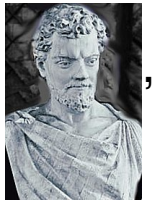
- Approche **réductionniste** :
  décrire le monde à l'échelle la plus petite, i.e. au niveau le plus *élémentaire*

Énergétisme *versus* atomisme

- **Énergétisme** : succès de la thermodynamique $\Rightarrow$ description purement continue de la matière.

  $\rightarrow$ chimiste allemand Wilhem Ostwald (1853-1932)

- **Atomisme** : univers discontinu, constitué d'éléments "insécables" ($\alpha\tau o\mu o\varsigma$)

  Démocrite ($\sim$460-370 av. JC)  , Lucrèce ($\sim$98-55 av. JC)  , ...

Ludwig Boltzmann

(1844-1906)

Paul Langevin

(1872-1946)

dans sa conférence « *L'esprit de l'enseignement scientifique* » en 1904 :

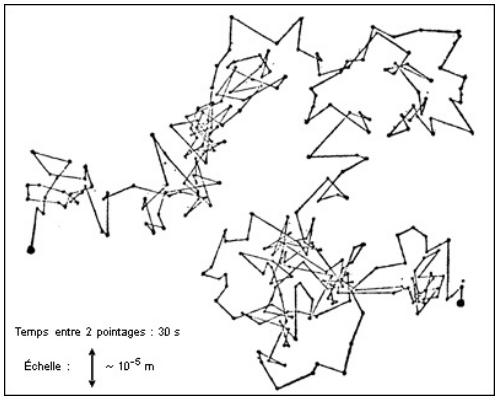
« [l'énergétisme est un] *ignorabimus* contre lequel protestent nos instincts et nos convictions »

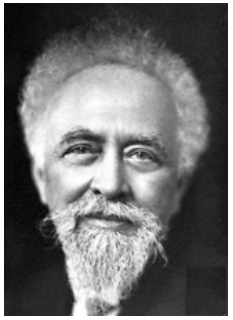
ignoramus et ignorabimus : « ce que nous ne savons pas et ne saurons jamais »

Remarque : de quand date la preuve expérimentale des atomes ?

QUIZ :

1. $\sim$60 av. J.C. (Lucrèce)
2. $\sim$800 (Abu al-Hudhayl)
3. 1591 (Giordano Bruno, *De minimo*)
4. 1827 (John Dalton, tableau des masses atomiques)
5. 1869 (Dmitri Ivanovitch Mendeleiev, classification périodique)
6. 1905 (Albert Einstein)
7. 1908 (Jean Perrin, mouvement brownien)
8. 1978 (Gerd Binnig & Heinrich Rohrer, microscope à effet tunnel)



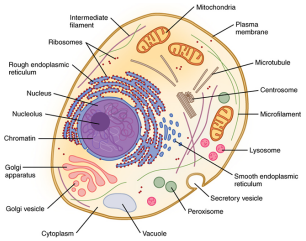


expérience de Jean Perrin (1870-1942, prix Nobel 1926)

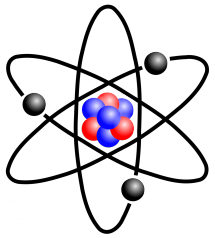
Réductionnisme : une approche **descendante** (top-down)

Echelle : 1 m

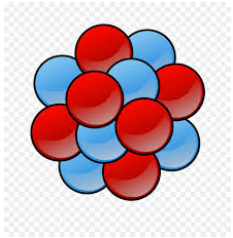
1 μm



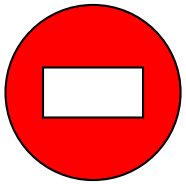
1 Å



1 fm



? ? ?



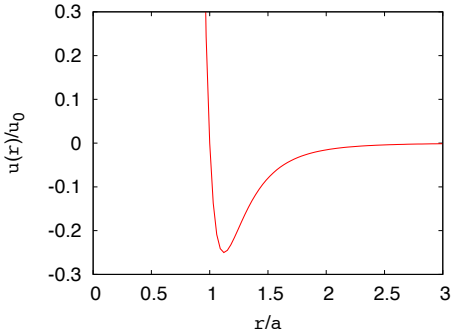
approche réductionniste

Pas de réponse à la question :

« comment s'organisent les constituants élémentaires à grande échelle ? »

Exemple : le fluide classique

Au niveau mIcroscopique : description simple



+ lois de Newton

interaction à deux corps

Au niveau mAcroscopique : la physique est **riche** et **diverse**

Au niveau macroscopique, il y a une grande richesse dont **l'explication n'est pas** (uniquement) **dans le niveau élémentaire**

$$\boxed{\text{Élémentaire} \neq \text{Fondamental}^{(*)}}$$

$^{(*)}$ "Fondamental" dans le sens de "fondements"

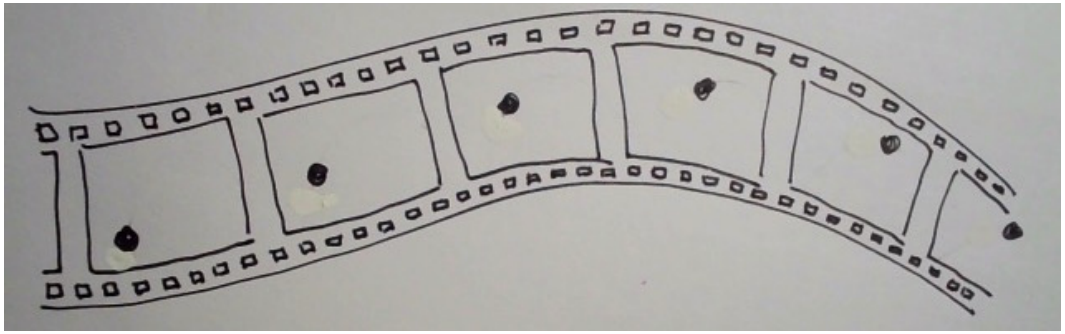
Micro *versus* Macro

Microscopique	Macroscopique
• discret	• continu
• petit nombres de lois simples (postulats de la MQ, équations de Maxwell,...)	• diversité, complexité, grand nombre de théories effectives
• comportement aléatoire	• déterministe
• équations réversibles	• irréversibilité

Mécanique newtonienne : réversibilité des lois

$\rightarrow$ équations de la mécanique invariantes sous

$$t \rightarrow -t$$



Irréversibilité à l'échelle macroscopique

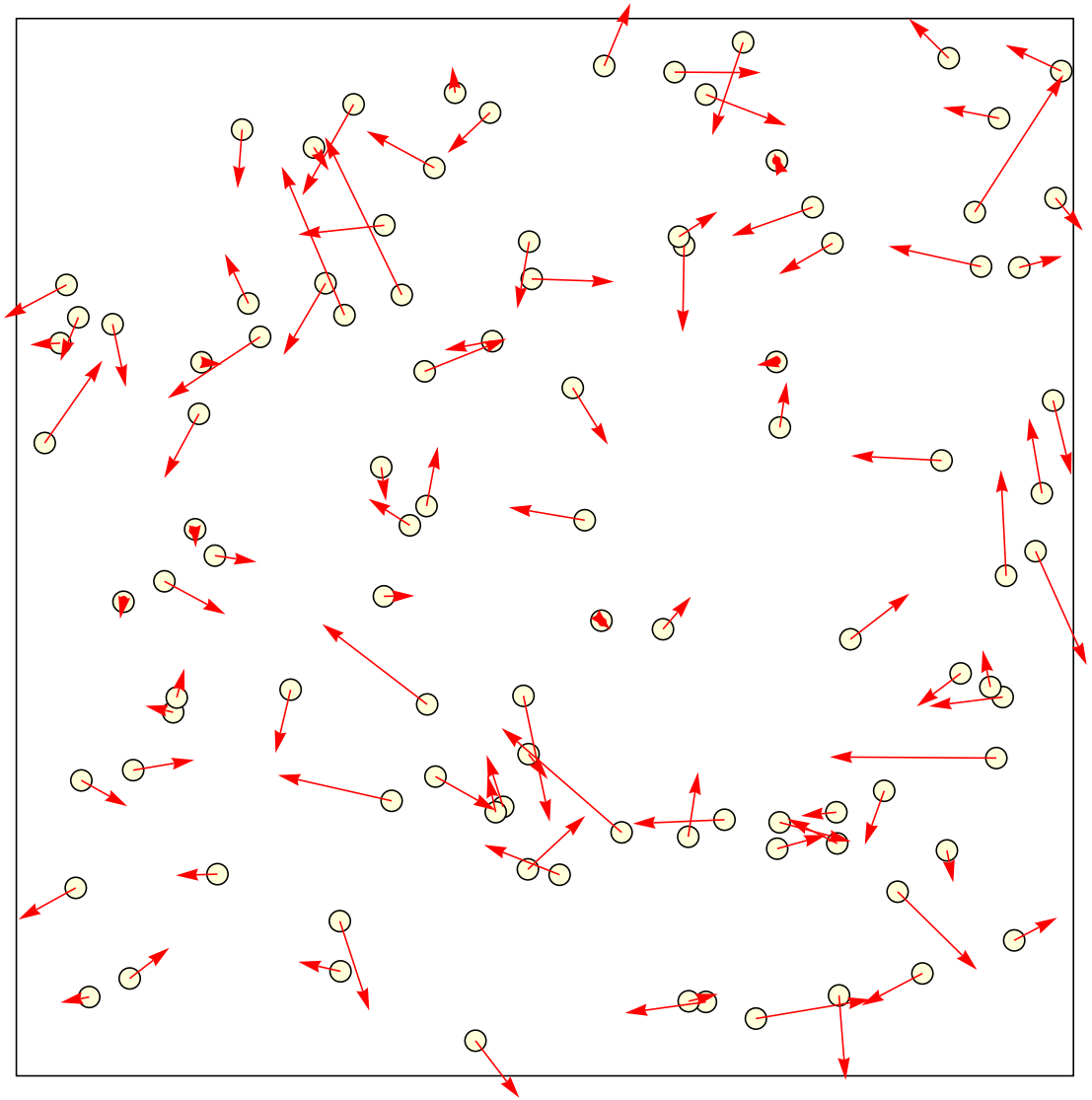
Plan

1. Du mAcroscopique au mIcroscopique : les limites de l'approche réductionniste
2. La physique statistique : du mIcroscopique au mAcroscopique
3. Émergentisme
   - Changement de perspective
   - Illustration : le théorème de la limite centrale

Objectif de la physique statistique :

Par l'utilisation d'outils **probabilistes**, la physique statistique permet de déduire les propriétés des systèmes **macroscopiques** à partir des lois qui gouvernent les constituants **élémentaires** aux échelles microscopiques

Gaz de N « atomes »

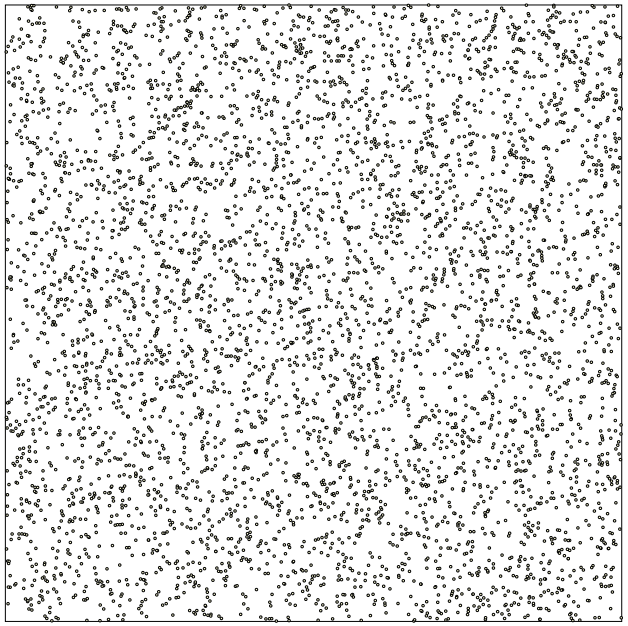


$N = 100$

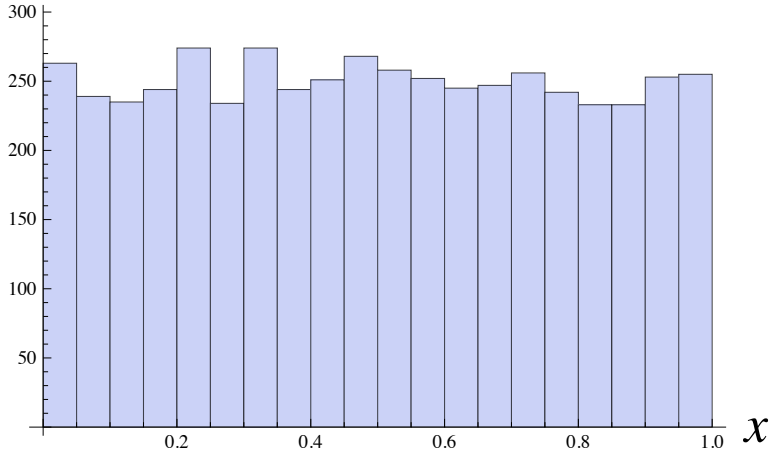
Informations microscopiques

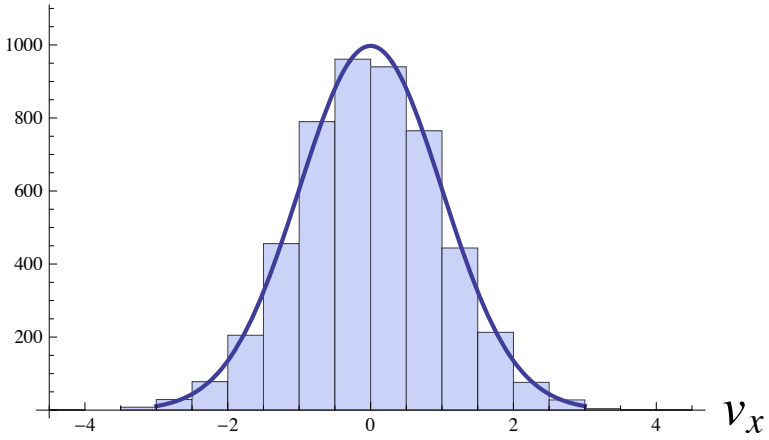
x	y	v_x	v_y
0.3481339673503039	0.8044479514019125	-1.6296637340939009	-0.17330986044336907
0.943959404658679	0.12813193244499477	0.812806796438423	0.4300848998593466
0.17276198311576696	0.6261067852573887	-0.6582154645152644	-1.2174608385147105
0.46055124775184053	0.25442041272746563	-0.3136164735855665	0.9805970397833481
0.14006225144553186	0.4677371375069985	1.1558487545104825	-0.6238148235750349
0.8336582975597342	0.17417228232681237	1.501374679233153	-1.4775425142866758
0.23061053136019805	0.698905388433749	-1.749994817332023	-1.1615821927514263
0.28152597239575927	0.8779305189530922	0.2799065195854414	-0.43495647484314803
0.3880555392247187	0.5388695376531125	0.2113665245174106	1.1238928271991324
0.14832414880233502	0.34385509840020334	-0.5277070498948921	0.1209178424866921
0.631693817285746	0.7853888857849345	-0.027342016693069866	-1.6394823744925753
0.3190611252791815	0.9188073776746031	-0.9714339552399226	-1.724040289571618
0.8932578286677433	0.38063091951769534	-0.8304478190721315	-0.6262481498578175
0.10135076366400786	0.4483960566658738	-0.06550359758787075	-0.32446623404654185
0.35500080543687873	0.260118513169014	-2.151790560949367	0.48629349837750263
0.43434361533645216	0.03327026946260059	0.8285427426639329	-1.0806565165683202
0.3452029464799755	0.5756311926554356	0.08811995940081274	-0.6401668087319606
0.2194985114865977	0.7304919014957585	-0.4441203934946385	0.9397507457922605
0.5263677711231913	0.6507220113082153	0.6631350569283433	-1.0754642145451174
0.7533116033395919	0.8215267499071246	-1.533178003185469	-0.5415114583147917
0.8209626024671028	0.2695908503497251	-0.3667364317997753	-1.0200883928271705
0.9363113893569659	0.4729287651212255	-0.0996402786924323	2.0030823254737427
0.7190262322540573	0.675189660956744	-0.3731323756784452	-0.061619276784647035
0.30667318823449286	0.09886265068786715	-0.8003770847863317	0.18159697511938094
0.7889985590436193	0.41293029635677314	1.1180665545444195	0.8636770689801199
0.3886336046839143	0.3513149821106487	-1.9844626370138359	1.5183695574966924
0.9641468998506606	0.4961831470138043	0.9689175990486405	-2.153546125089086
0.17519735461277697	0.674871435792221	0.3957099296830754	-0.03711617802826213
0.3954130010879797	0.8587480142599067	-1.2838772712715474	0.695567687130941
0.9885170153801843	0.9502569355989523	-1.059074848106663	0.49485599883142606
0.19023891689654704	0.1907588855761544	-0.7885344280035872	-0.023389462177139966
0.11053976986827152	0.28912558974990143	1.1557251848827483	0.19367841599587346
0.04143574189148591	0.6929788771263379	-0.5676269678772149	-0.030961911748494567
0.1691189347327009	0.516941813701161	0.010840189334410156	-0.34573762418285114
⋮	⋮	⋮	⋮

Informations statistiques



$N = 5\,000$





Informations thermodynamiques

- Volume de l'information microscopique :

$$\sim N \log_{10} N \quad \text{avec} \quad N \sim 10^{23}$$

- Informations thermodynamiques : quelques paramètres

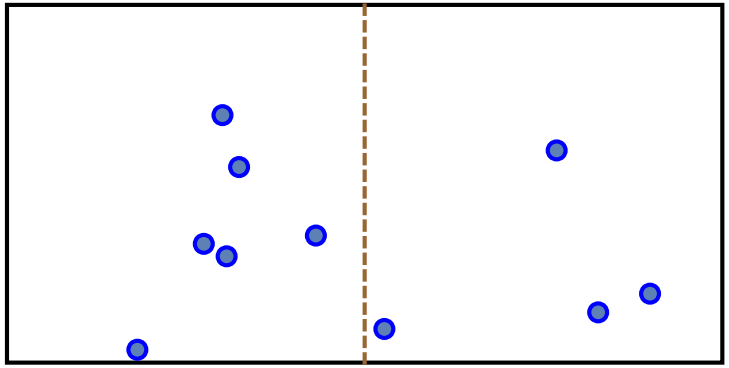
densité $n = N/V$,

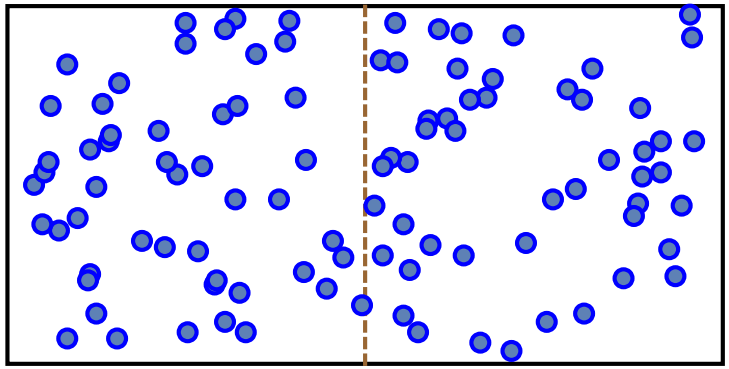
température T,

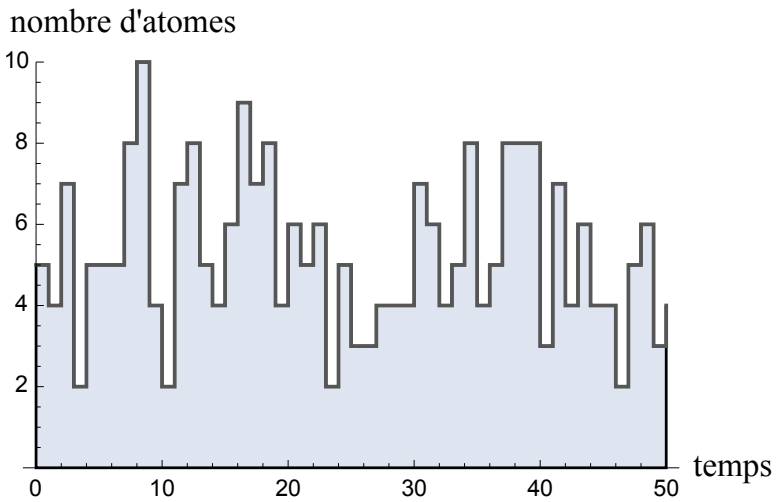
pression P, ...

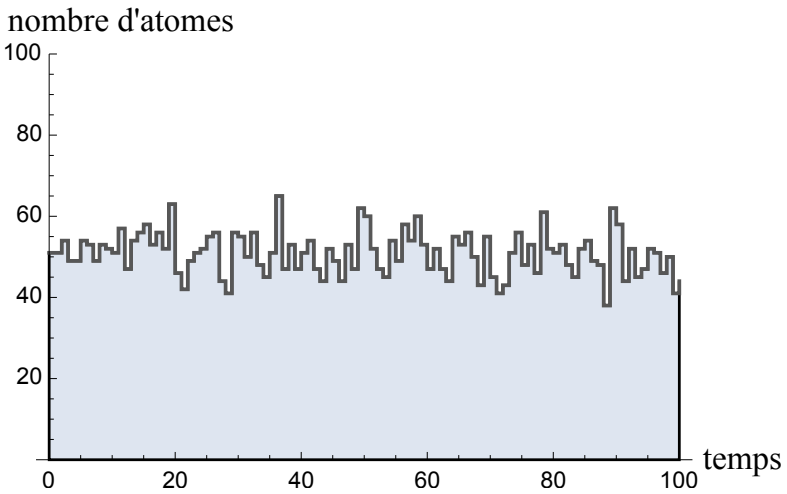
Comment passe-t-on de $N \sim 10^{23}$ à quelques variables ?

$\rightarrow$ à l'équilibre macroscopique : $N_{\text{gauche}}(t)$









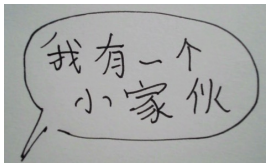
les fluctuations *relatives* de $N_{\text{gauche}}(t)$ sont $\sim 1/\sqrt{N} \rightarrow 0$ si $N \rightarrow \infty$

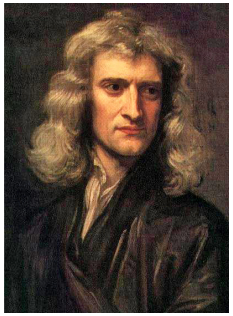
Élémentaire *versus* collectif :

"microscopique *versus* macroscopique" $\longrightarrow$ "élémentaire *versus* collectif"

• La mécanique newtonienne (ou quantique) est correcte, mais elle ne fournit pas le « *bon langage* » pour analyser et comprendre les phénomènes **collectifs** (pour $N \sim 10^{23}$ degrés de liberté)

• Le « *bon langage* » (de la phys. statistique) : des concepts probabilistes



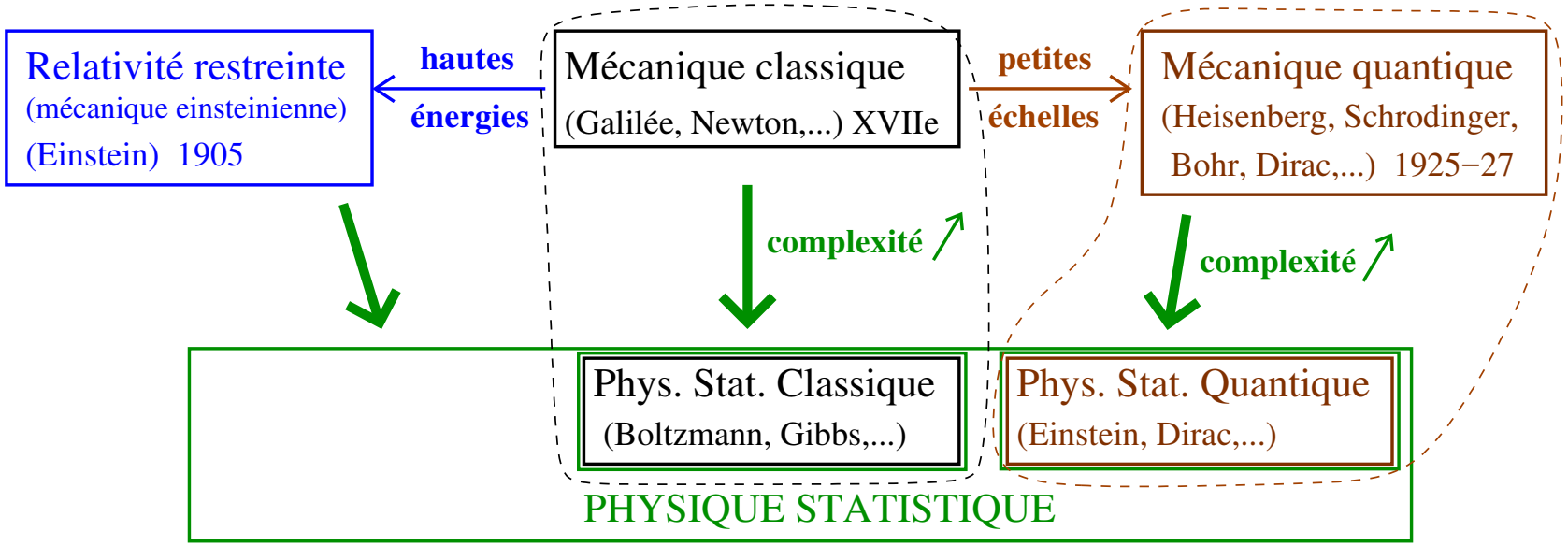


Dynamique élémentaire + Physique statistique

$\downarrow$

description au niveau macroscopique

La physique statistique est une théorie fondamentale « sur-couche »



... et la thermodynamique dans tout cela ?

la thermodynamique est aussi une théorie « sur-couche »

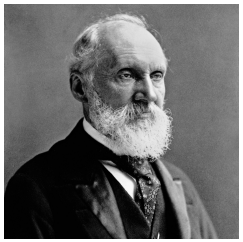
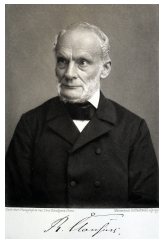
... mais....

Rapport entre la thermodynamique et la physique statistique :

- Thermodynamique :
  une théorie axiomatique, permettant de construire des **modèles phénoménologiques** (basés sur l'observation au niveau macroscopique)

- Physique statistique :
  Permet de construire des « **modèles microscopiques** » (basés sur la description à l'échelle élémentaire)

La physique statistique est plus ambitieuse, a un potentiel prédictif supérieur et ... fonde la thermodynamique

: 0

: 1

Plan

1. Du mAcroscopique au mIcroscopique : les limites de l'approche réductionniste

2. La physique statistique : du mIcroscopique au mAcroscopique

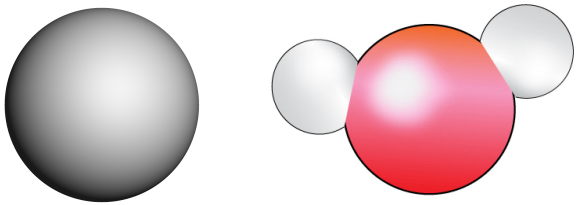
3. Émergentisme
   - Changement de perspective
   - Illustration : le théorème de la limite centrale

Plan

1. Du mAcroscopique au mIcroscopique : les limites de l'approche réductionniste
2. La physique statistique : du mIcroscopique au mAcroscopique
3. Émergentisme
   - Changement de perspective
   - Illustration : le théorème de la limite centrale

Le cours a commencé en pulvérisant le mythe réductionniste ! (l'idée que le niveau ultime de la connaissance serait dans l'échelle la plus élémentaire)...

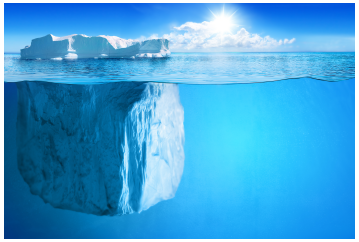
La physique statistique s'inscrit dans un courant de pensée dit **émergentiste**, i.e. dans une logique **ascendante** (**bottom-up**)

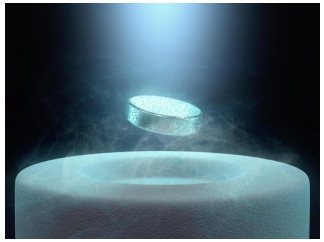


... + quelques lois simples

(méca. Newtonienne ou méca. Quantique)

$\Downarrow$





etc...

À l'échelle macroscopique, il y a **émergence** de phénomènes collectifs imprévisibles avec la seule compréhension de la dynamique à l'échelle microscopique.

- Les phénomènes collectifs sont peu sensibles aux détails microscopiques...
- Chaque échelle requiert son propre niveau d'analyse :
  $\exists$ une forme de **découplage** entre échelles, reposant sur l'existence de puissants principes d'auto-organisation

Point de vue développé dans :

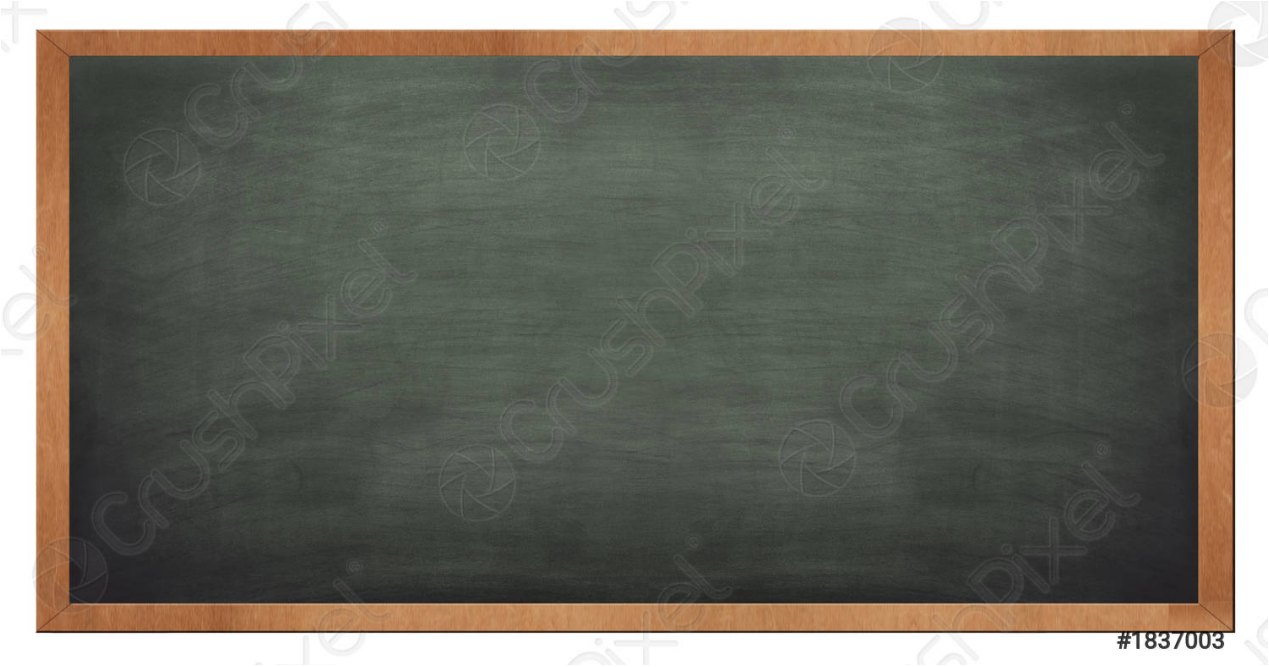
- P. W. Anderson, « *More is different* », Science **177** (1972)
  (Philip W. Anderson (1923-2020), prix Nobel 1977)

- R. Laughlin, « *Un univers différent* », Fayard, 2005
  (Robert B. Laughlin (1950-...), prix Nobel 1998)

Plan

1. Du mAcroscopique au mIcroscopique : les limites de l'approche réductionniste

2. La physique statistique : du mIcroscopique au mAcroscopique

3. Émergentisme
   - Changement de perspective
   - Illustration : le théorème de la limite centrale

... on passe à ...