

Paul-Antoine Hervieux

hervieux@unistra.fr

Les cours seront disponibles sur mon site  
dans la rubrique: L1

# Concepts et principes de la Physique

La nature de la Physique au travers:

- de son développement
- de ses concepts
- de ses principes et lois.

« *On ne connaît pas complètement une Science tant qu'on n'en sait pas l'histoire* »

**Auguste Comte** (fondateur du positivisme)



2005 année mondiale de la Physique !!

Il y a 120 ans ....

## Positivisme

**positivisme**, système philosophique dont la méthode épistémologique se fonde sur l'expérience et la connaissance empirique des phénomènes. Ainsi, le positivisme considère la pensée spéculative comme une méthode de connaissance inappropriée et imparfaite.

*Auguste Comte soutenait qu'une étude empirique des processus historiques et, en particulier, du progrès des différentes sciences interdépendantes, révèle la loi des trois états qui régit le développement humain. Il livra une analyse de ces états dans son œuvre capitale, les six volumes des Cours de philosophie positive (1830-1842). La nature de l'esprit humain est ainsi faite, pensait-il, que chaque science ou branche du savoir traverse « trois états théoriques différents : l'état théologique ou fictif, l'état métaphysique ou abstrait, et enfin, l'état scientifique ou positif ». Le stade théologique est caractérisé par une explication immature des phénomènes, renvoyés à la volonté des dieux ou de Dieu. Au stade métaphysique, l'explication des phénomènes fait appel à des catégories philosophiques abstraites. Le stade final de l'évolution, le stade scientifique, va de pair avec le rejet de toute quête d'explication causale absolue. L'attention est entièrement tournée sur les liens entre les phénomènes, dans le but de parvenir à des généralisations soumises à la vérification par l'observation. L'œuvre de Comte est considérée comme l'expression classique de l'attitude positiviste qui fait des sciences empiriques la seule source appropriée de la connaissance.*

## Motivations (I)

- « La motivation d'un cours d'Histoire des Sciences (en ce qui nous concerne aujourd'hui, de la Physique ainsi que de ses liens étroits avec les Mathématiques) est évidente, en effet il est de plus en plus difficile d'essayer d'aborder les problèmes actuels que la nature nous pose sans ne rien savoir du long cheminement à travers les siècles de l'histoire de sa connaissance et des principales personnes qui l'ont fait progresser. » (A. Bérard)
- « L'élève ne trébuche pas toujours par sa faute; à force de lui cacher la genèse de ce qu'on lui apprend, la science scolaire s'enrobe d'un mystère qui accroît la difficulté. » (Bruno Jarrosson)
- « Un enseignement détaché de son histoire ne restitue pas le questionnement, si important pour le développement et la compréhension de la science. » (Bruno Jarrosson)

## Motivations (II)

- En restituant le scénario des découvertes scientifiques souvent pleines de péripéties, la genèse des idées en physique nous est révélée.
- « Depuis l'étude du mouvement des corps célestes par les astronomes de l'Antiquité grecque jusqu'à celle de la structure des particules élémentaires par les physiciens actuels, des hommes tentent inlassablement d'expliquer scientifiquement les phénomènes qui nous entourent. » (J. P. Maury)

## Motivations (III)

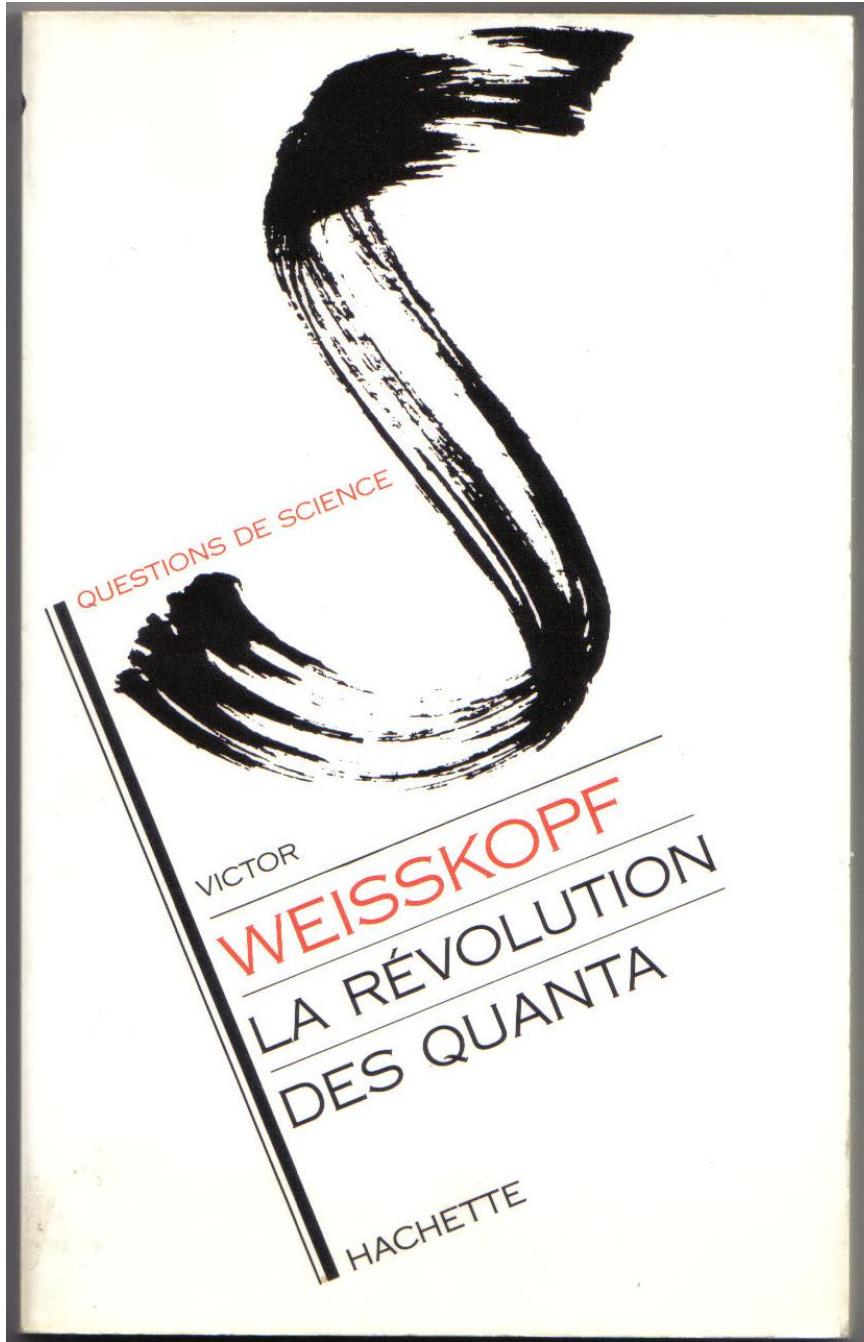
La science répond d'abord à une aspiration qui caractérise l'homme comme tel: l'aspiration à connaître. S'efforcer de découvrir les lois fondamentales de la nature qui gouvernent le monde dans lequel nous vivons. Observer, classer les phénomènes observés pour y mettre de l'ordre; dégager l'absolu et l'invariant en étudiant les phénomènes dans des conditions spéciales et inhabituelles établies par l'ingéniosité de l'homme telle est **l'âme de la recherche fondamentale**. **Cette recherche se développe, doit se développer, sans autre but que d'accroître et de préciser les connaissances.**

Or, même si cela peut paraître paradoxal, c'est de cette recherche libre à l'égard de toute idée d'application que naissent les idées neuves qui permettent précisément les applications les plus efficaces.

Le but premier de la science n'est pas l'application; c'est, je le répète, de mieux comprendre les causes et les lois qui gouvernent les processus naturels. Mais une meilleure compréhension des processus naturels conduit presque toujours à la possibilité de les maîtriser ou, à tout le moins, de maîtriser d'autres processus en relation avec celui qui est l'objet de la recherche. Plus la science se développe, on le sait, plus nombreuses et étroites sont les relations qu'on établit entre des processus qui paraissaient d'abord n'avoir aucun lien de parenté.



Victor Weisskopf (La révolution des Quanta)





*Wir müssen wissen. Wir werden wissen.*  
(Nous devons savoir. Nous saurons.)

## **David Hilbert (1862-1943)**

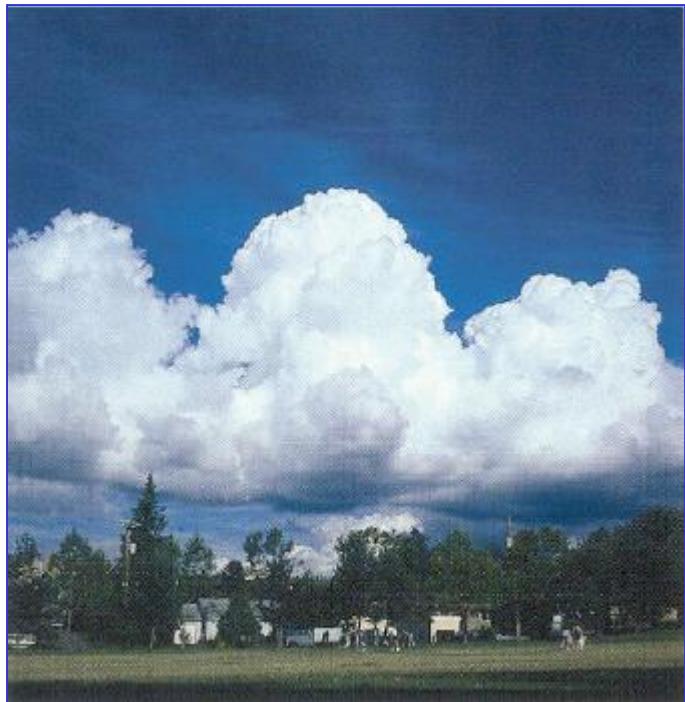
Le père des XXIII problèmes

Le 8 août 1900, au Second Congrès International des Mathématiciens réuni à Paris, il énonce le futur des mathématiques sous la forme de 23 problèmes à résoudre pour le XX ème siècle. Trois ne sont pas résolus à l'heure actuelle, dont ...la conjecture de Riemann.

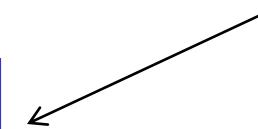
Le mot science vient du mot latin *scire* qui signifie savoir, connaissance

Y a-t-il plus beau ?

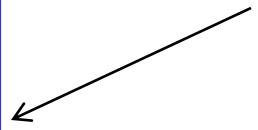
# Interrogation sur la nature du monde



Pourquoi le ciel est-il bleu ?  
(Rayleigh fin du XIX<sup>ème</sup>)



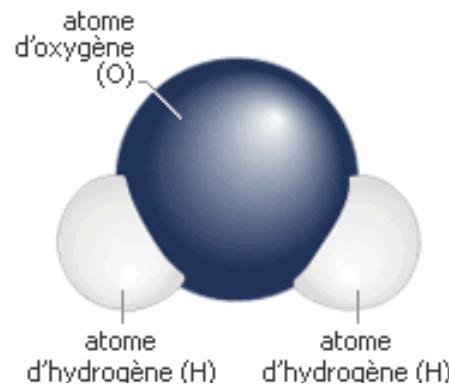
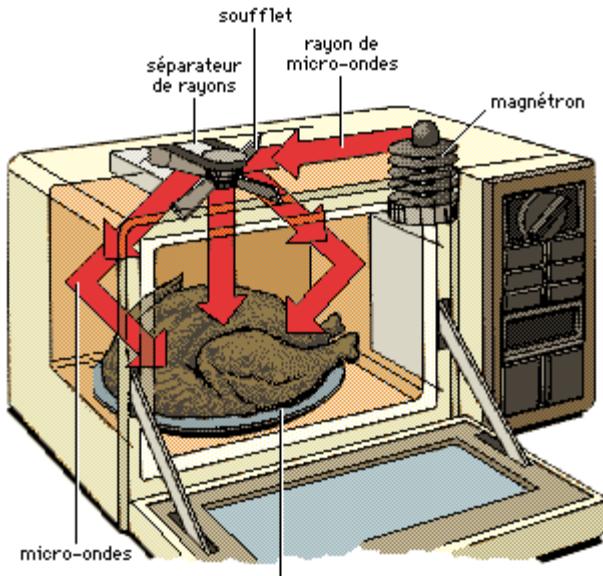
Pourquoi les nuages sont-ils  
blancs ou gris ?  
(Mie début du XX<sup>ème</sup>)



Lord Rayleigh



# Comment ça marche ?



- Fréquence: de 3 à 300 GHz
- Longueur d'onde: 1 mm à 0.1 m

→ Rotation des molécules d' $\text{H}_2\text{O}$

## Vibrations of Circular Membranes (Drums) & Plates (Cymbals)

TABLE 3.1. Vibration frequencies of a circular plate with clamped edge.

$f_{01} = 0.4694c_L h/a^2$	$f_{11} = 2.08f_{01}$	$f_{21} = 3.41f_{01}$	$f_{31} = 5.00f_{01}$	$f_{41} = 6.82f_{01}$
$f_{02} = 3.89f_{01}$	$f_{12} = 5.95f_{01}$	$f_{22} = 8.28f_{01}$	$f_{32} = 10.87f_{01}$	$f_{42} = 13.71f_{01}$
$f_{03} = 8.72f_{01}$	$f_{13} = 11.75f_{01}$	$f_{23} = 15.06f_{01}$	$f_{33} = 18.63f_{01}$	$f_{43} = 22.47f_{01}$



Encyclopédie Encarta, Dorling Kindersley

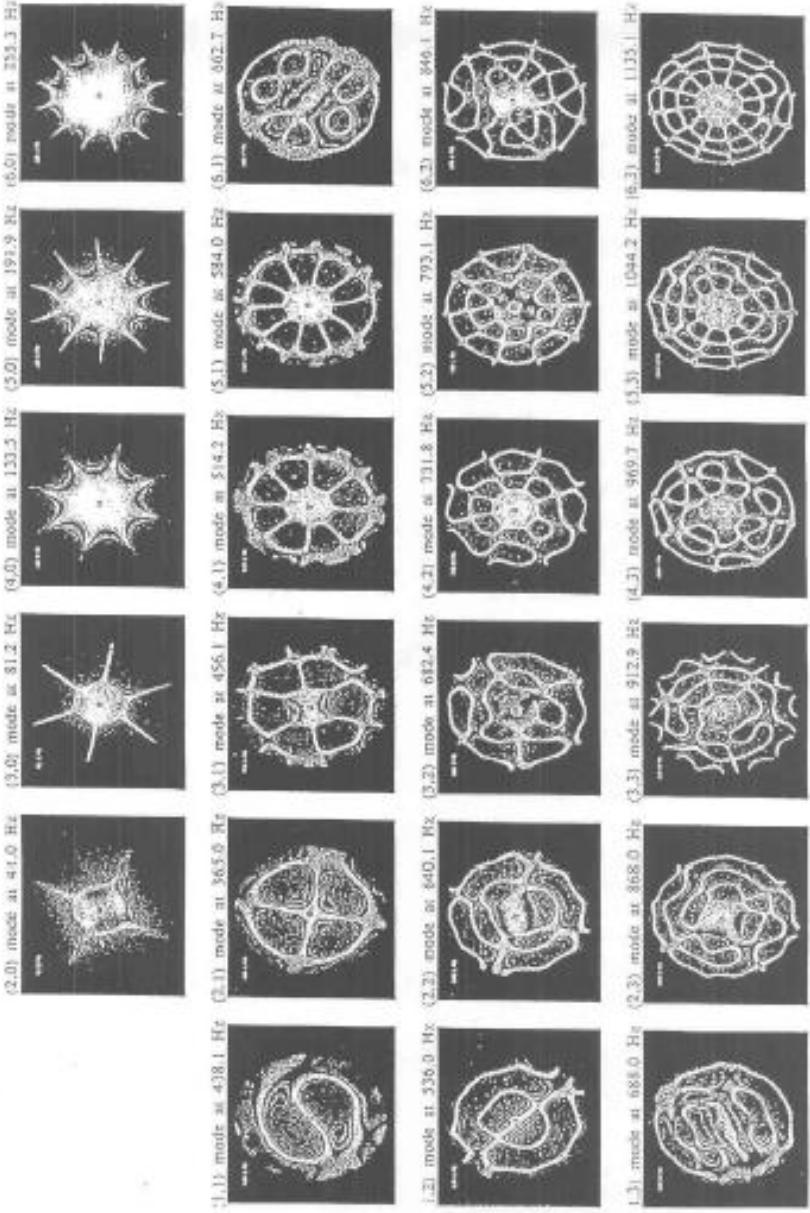
3.2. Vibration frequencies of a circular plate with free edge.

—	$f_{20} = 0.2413c_L h/a^2$	$f_{30} = 2.328f_{20}$	$f_{40} = 4.11f_{20}$	$f_{50} = 6.30f_{20}$
$73f_{20}$	$f_{11} = 3.91f_{20}$	$f_{21} = 6.71f_{20}$	$f_{31} = 10.07f_{20}$	$f_{41} = 13.92f_{20}$
$34f_{20}$	$f_{12} = 11.40f_{20}$	$f_{22} = 15.97f_{20}$	$f_{32} = 21.19f_{20}$	$f_{42} = 27.18f_{20}$

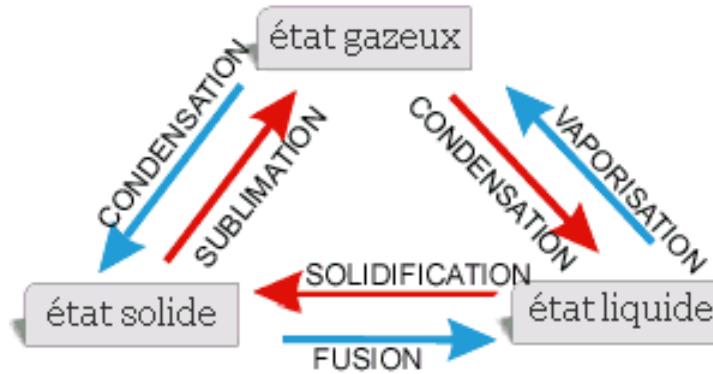
TABLE 3.3. Vibration frequencies of a circular plate with a simply supported edge.

$f_{01} = 0.2287c_L h/a^2$	$f_{11} = 2.80f_{01}$	$f_{21} = 5.15f_{01}$
$f_{02} = 5.98f_{01}$	$f_{12} = 0.75f_{01}$	$f_{22} = 14.09f_{01}$
$f_{03} = 14.91f_{01}$	$f_{13} = 20.66f_{01}$	$f_{23} = 26.99f_{01}$

### Modes of an 18 inch Medium Crash Cymbal



# Transitions de phases...



## Pour commencer

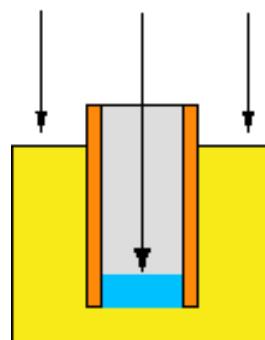
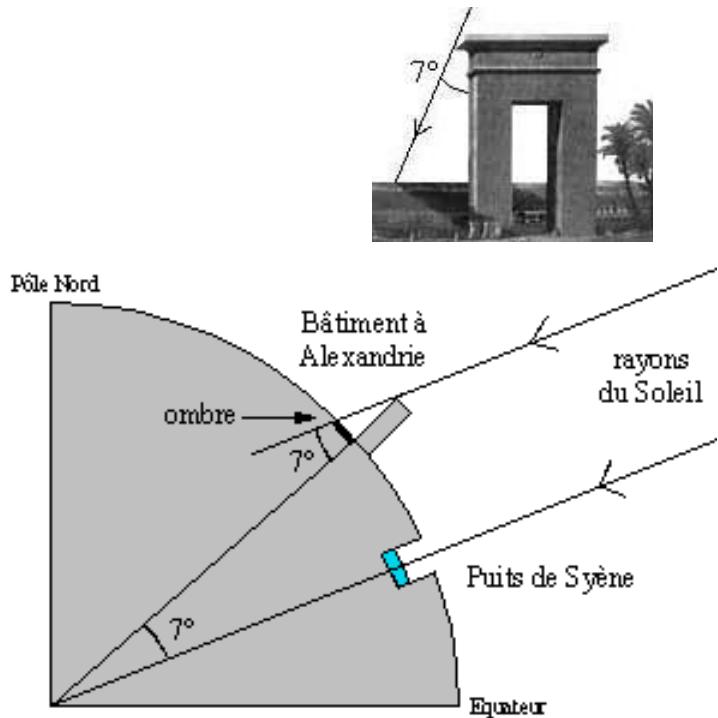
Quelques faits marquants dans l'histoire de la physique...

- Des expériences fondatrices ...
- Sources et évolution de la physique.
- L'émerveillement de la prédiction révélée par l'expérience.
- Du rêve à la réalité.

# Méthode historique d'Eratosthène

Avec son invasion en **332 avant J.C.** par Alexandre le Grand l'Egypte va vivre pendant trois siècles son influence grecque. Pendant cette période, la Science connaîtra de très grands progrès, notamment en Astronomie et en Mathématiques.

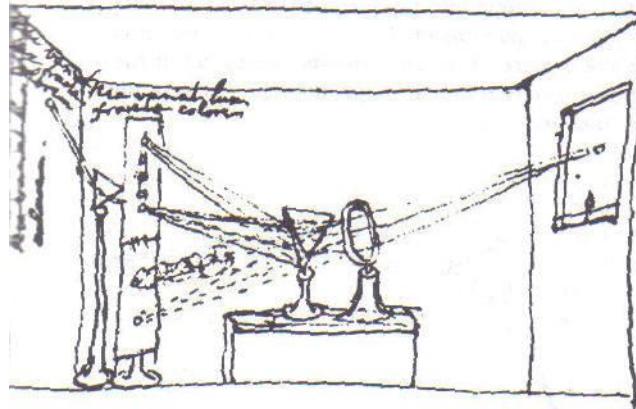
**les ombres le jour du solstice d'été dans deux villes**



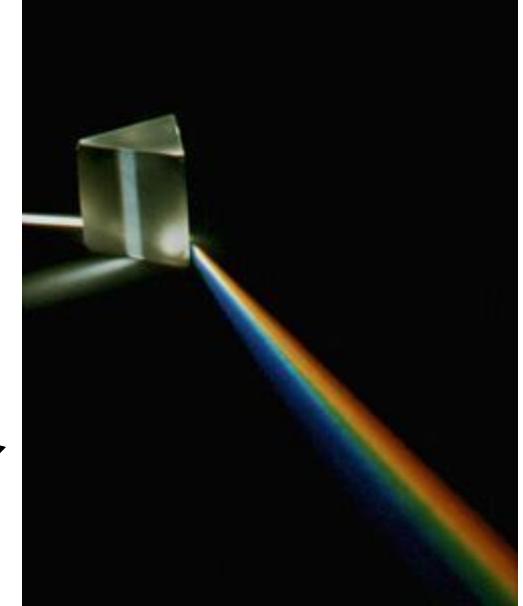
Première mesure de la **circonference de la Terre** depuis la terre !

**(40349 km à comparer à **40074 km** actuellement mesurés)**

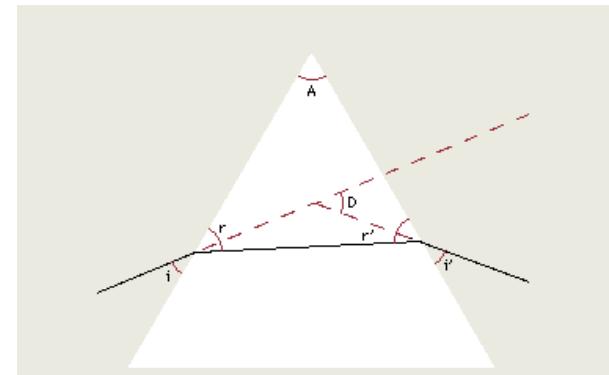
## Prisme de Newton (1666)



Lumière décomposée par un prisme



Lorsqu'un faisceau de lumière traverse un prisme, il est réfracté et \_\_\_\_\_  
décomposé en rayonnements monochromatiques.



## En 1800 la pile de Volta (1745-1827)



Empilement de disques en cuivre et en zinc séparés par du carton imbibé d'eau salée

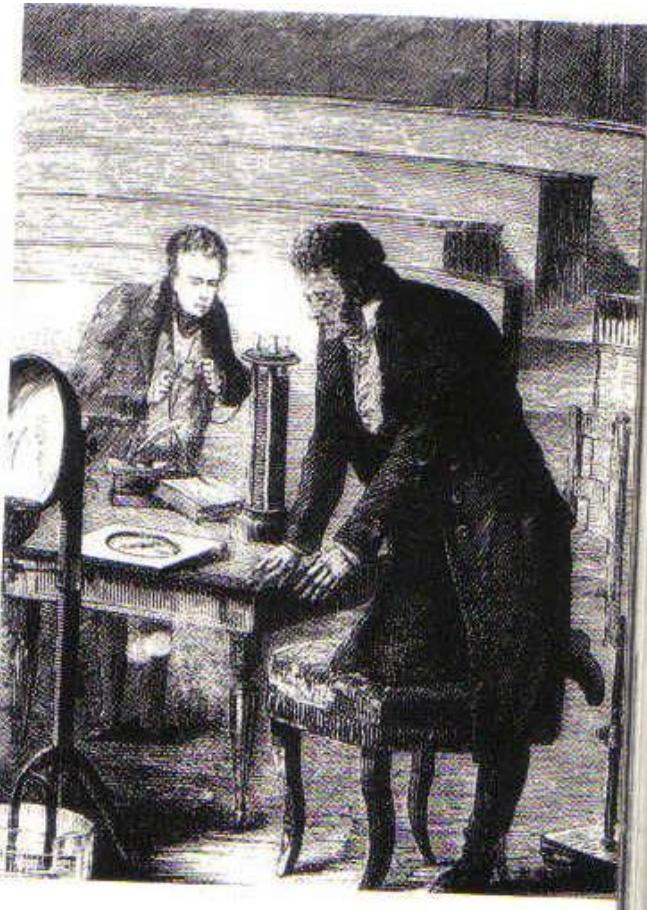
(application: mouvement convulsif des nerfs et des muscles vivants)



Version moderne

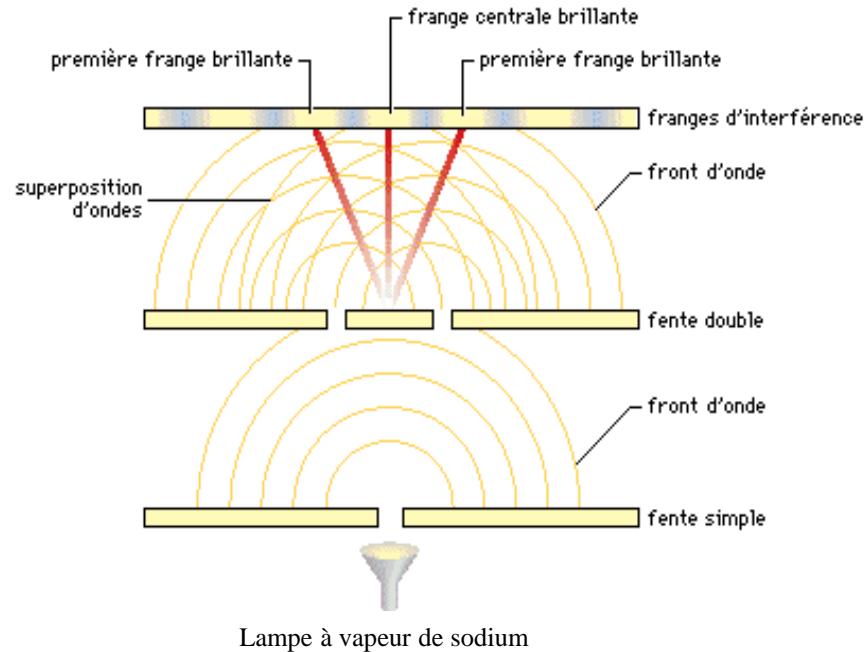
## Hans Christian Oersted (1820)

Un courant est capable de faire dévier une aiguille aimantée



- Expérience **fondatrice** de l'**électromagnétisme**
- Avant, le magnétisme et l'électricité étaient considérés comme **totalemen**  
**indépendants**

# Le fentes de Thomas Young (1801)



## Nature ondulatoire de la lumière

Expérience *cruciale* car elle vérifie définitivement  
la théorie ondulatoire de **Huygens**

## Jean Joseph Le VERRIER URBAIN (1811-1877)



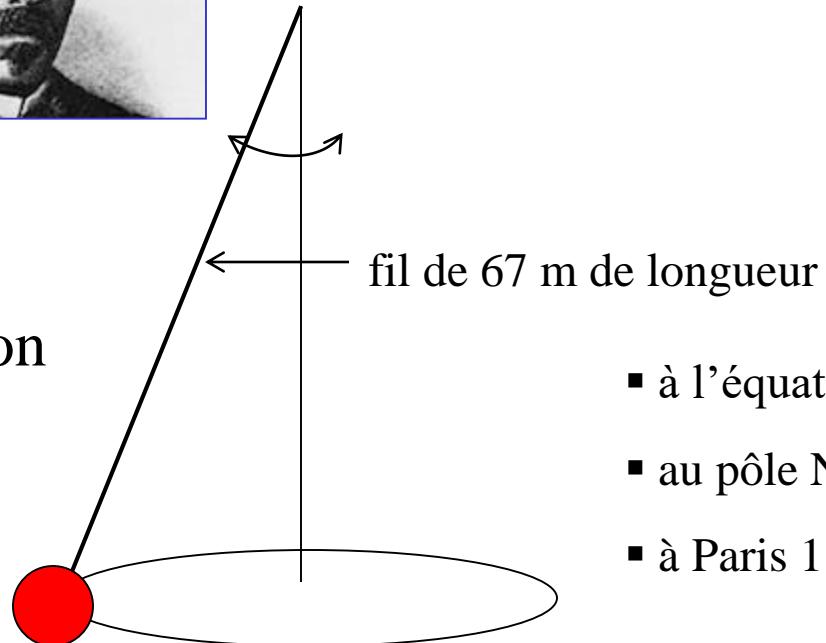
- Astronome, spécialiste de la mécanique céleste
- L'orbite observée d'Uranus présentait avec l'orbite calculée des écarts qui restaient inexpliqués.
- Le Verrier s'attaqua au problème au début de l'été **1845**.
- Le **18 septembre 1846**, Le Verrier envoya ses calculs à Galle, directeur de l'observatoire de Berlin.
- Le **23 septembre 1846**, jour même où il avait reçu de Le Verrier une lettre précisant la position de cet objet, l'astronome berlinois observait l'astre prédict dans la zone du ciel indiquée par Le Verrier.
- Devant l'Académie des sciences, Arago s'exclama :  
**«M. Le Verrier a vu un astre au bout de sa plume !»**
- La nouvelle planète fut baptisée **Neptune**.
- Le seul désaccord irréductible que Le Verrier relevait dans la comparaison entre l'observation et les orbites calculées était un résidu de 38" pour le mouvement séculaire du **périhélie de Mercure**. C'est précisément ce résidu, confirmé et à peine modifié, qui devait fournir un demi-siècle plus tard la première preuve matérielle de la **relativité générale**.



## Le pendule de Foucault (1851)



Panthéon



masse de 28 kg

- à l'équateur, le pendule ne tourne pas
- au pôle Nord, il effectue un tour en 24 heures
- à Paris  $11^\circ/h$

Mise en évidence de la **rotation de la Terre** sur terre

→ La terre ne constitue pas un *référentiel galiléen*

« ...Avec **J. Clerk Maxwell**, une nouvelle ère scientifique s'est ouverte... »  
**Albert Einstein**

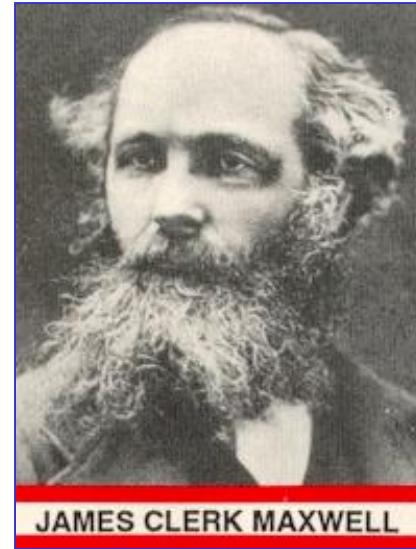
$$\vec{\nabla} \wedge \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0}$$

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \varepsilon_0 \mu_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

(1873)



« *Imaginez son émotion lorsque les équations qu'il avait formulées lui révélèrent que les champs électromagnétiques se propagent sous forme d'ondes polarisées, et à la vitesse de la lumière ! Peu d'hommes au monde peuvent se vanter d'avoir eu une telle expérience.* » **Albert Einstein**

## Les expériences de Hertz (1888)

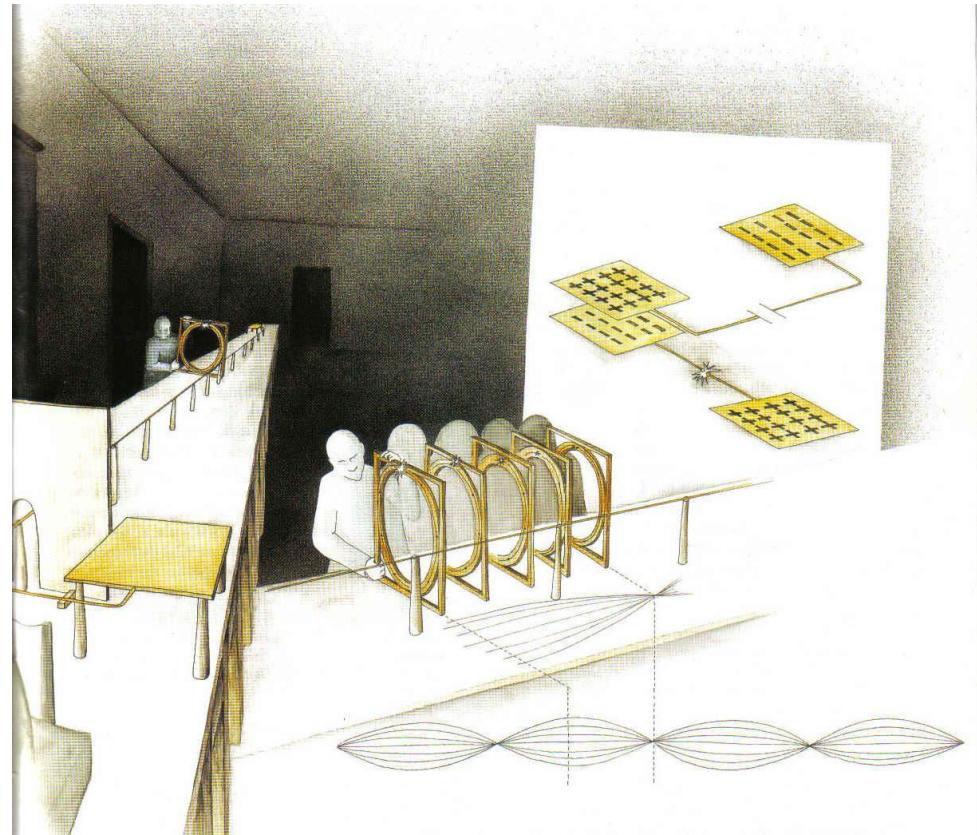
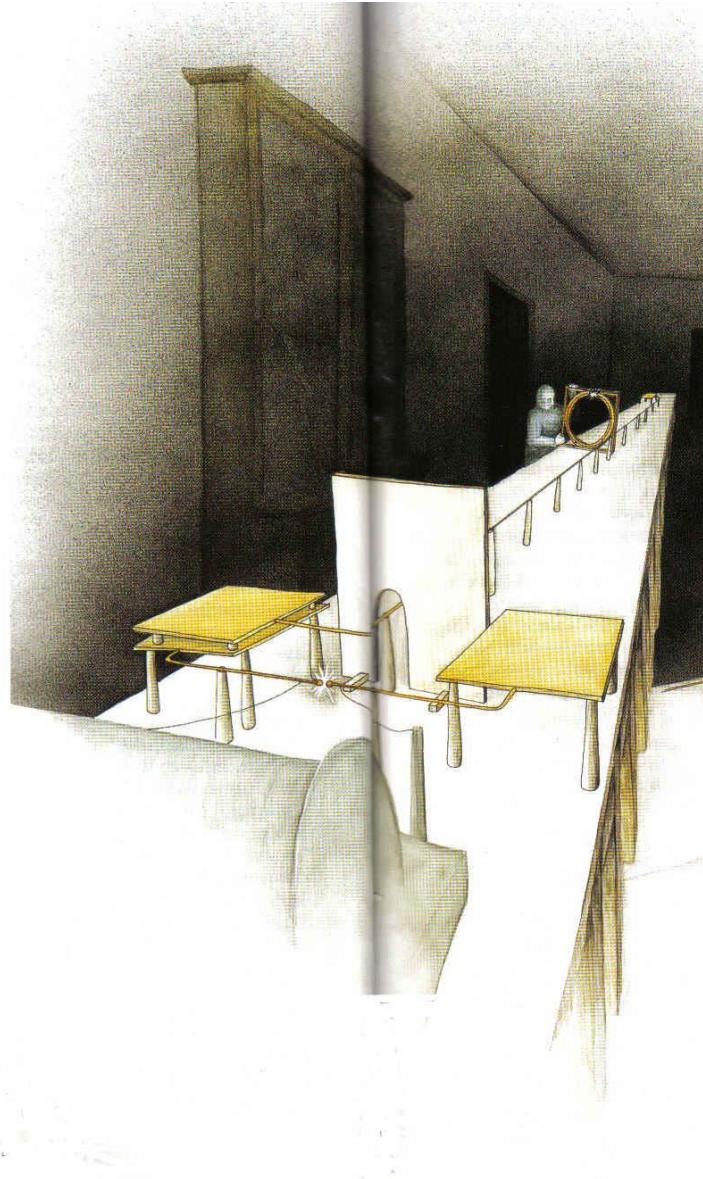
Lieu: Ecole supérieure technique de Karlsruhe  
élève de Hermann von Helmholtz (Berlin)



« *La théorie de Maxwell, ce sont ses équations* »

Il vérifie que les solutions des équations  
de Maxwell sont des **ondes**

# Les expériences de Hertz (1888)





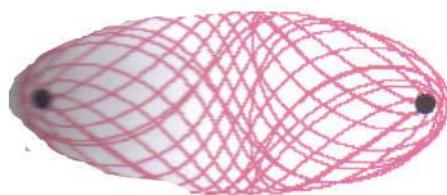
Fin du XIX, à l'orée de la relativité...

## Henri Poincaré (1854-1912)

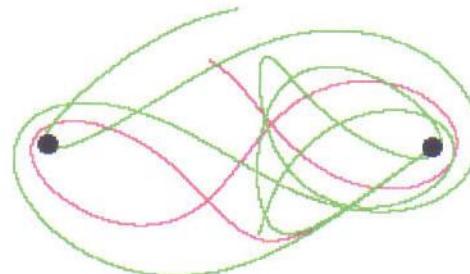
- l'un des pères de la relativité restreinte
- Propage les idées de Maxwell en France
- Problème des 3 corps



Système dynamique → Chaos

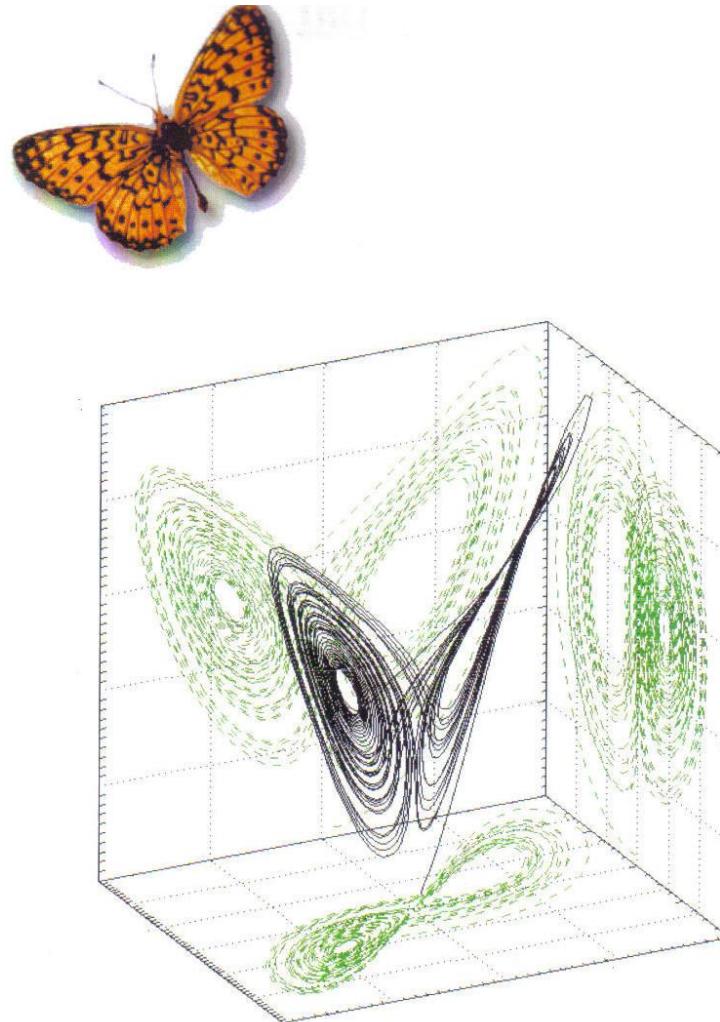


Mouvement complexe des 3 corps

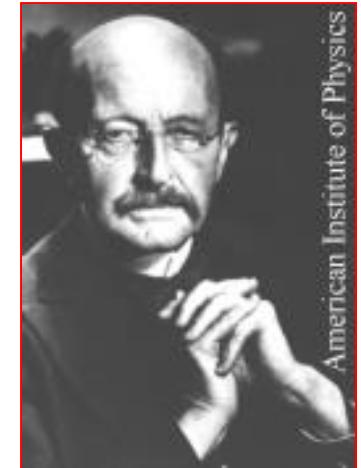
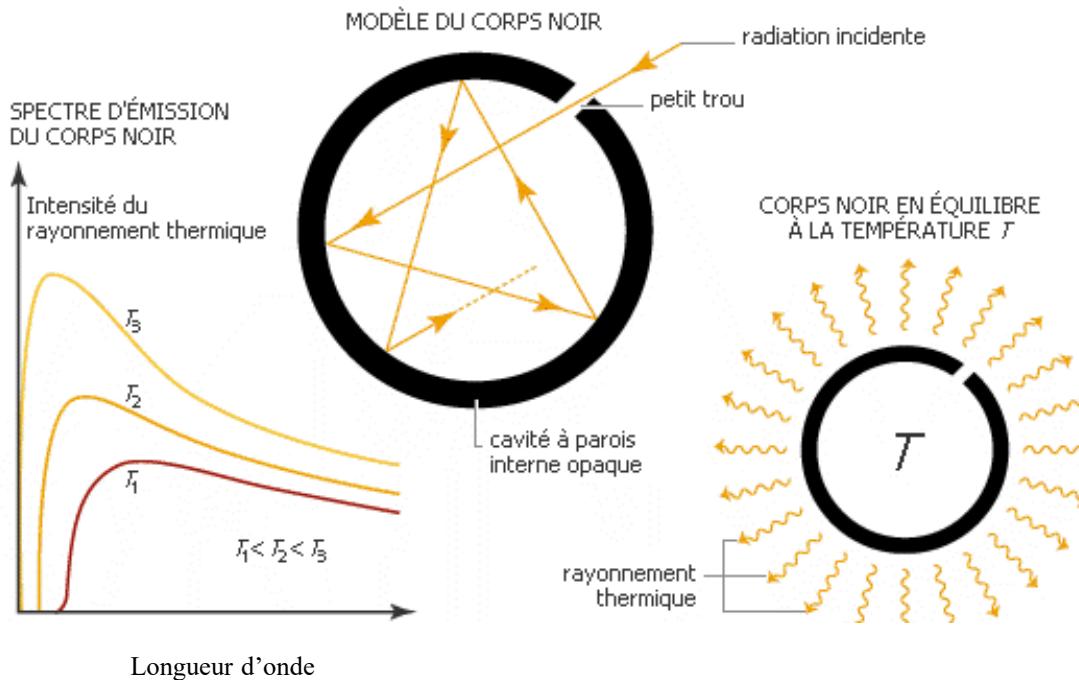


Sensibilité aux conditions initiales  
→ Chaos

Physique de l'atmosphère → Lorentz (1963) → attracteur étrange  
Effet papillon...  
Prévisions météorologiques...



# Le corps noir (1900)



Max Planck  
(1900)

Une révolution scientifique...  
Un changement de paradigme (Thomas Kuhn)

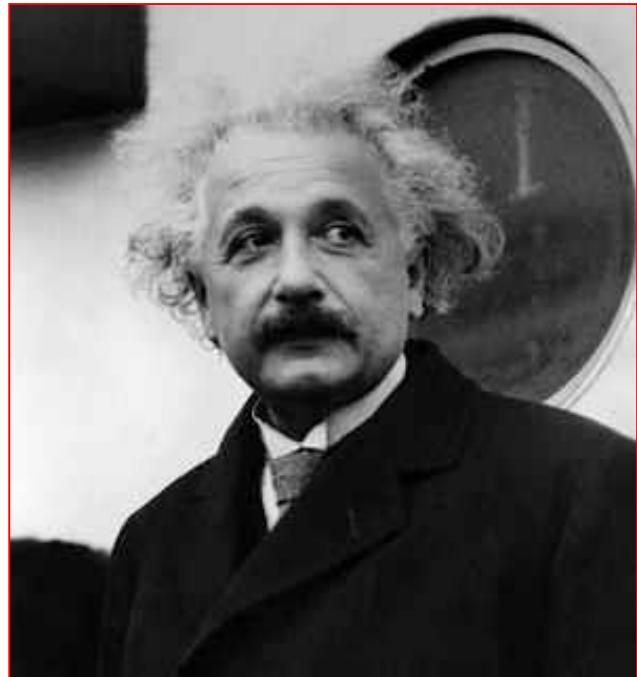
## Structure des révolutions scientifiques

L'activité normale consiste à chercher des solutions aux problèmes qui se posent dans le cadre du *paradigme*, en faisant jouer les règles dans le *paradigme*, en ajustant les résultats expérimentaux et les prédictions théoriques par exemple.

La science normale ne cherche pas **à innover**; c'est, selon Thomas Kuhn, une activité foncièrement **conservatrice** qui consiste à actualiser le potentiel de solutions offertes par un paradigme.



## 1905: Une année de folie ...



- Effet photoélectrique (Nobel en 1921)
- Mouvement brownien
- Théorie de la relativité restreinte

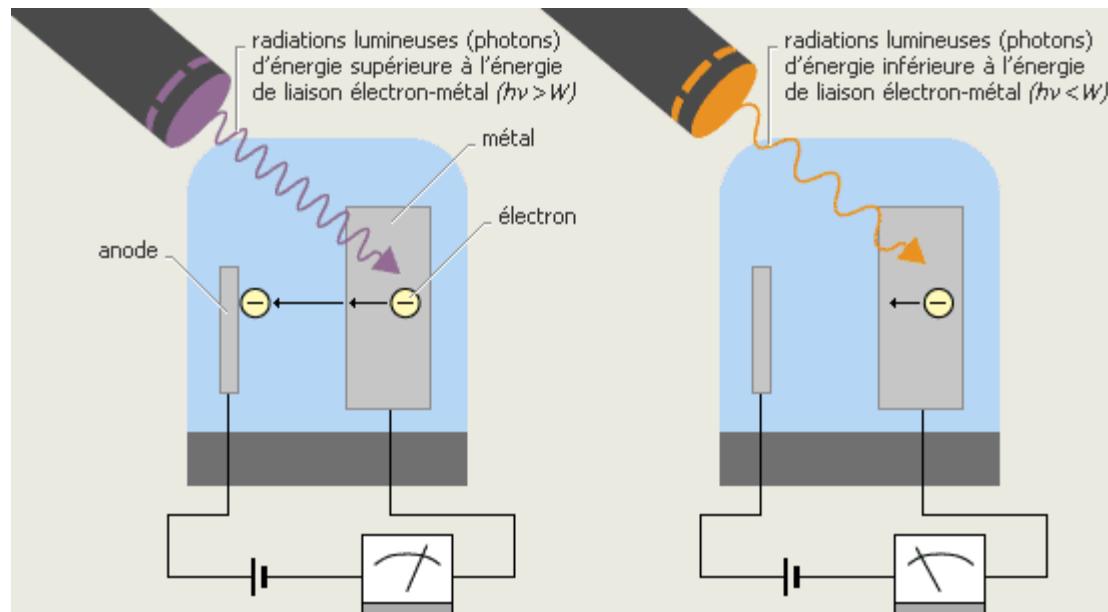
Albert Einstein (1879-1955)

# L'effet photoélectrique (I)

Première facette de la dualité onde-corpuscule avant  
**Louis de Broglie** en 1924



- Le champ électromagnétique est *quantifié*
- Les quanta de ce champ sont les **photons**



Aspect *corpusculaire* de la lumière

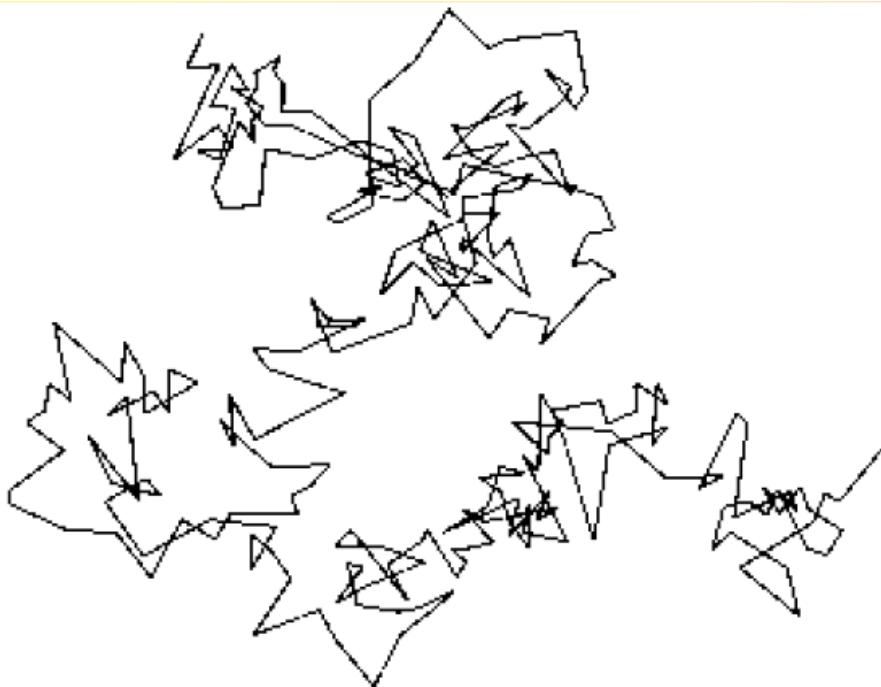
# Les quanta de lumière et l'effet photoélectrique

## La microstructure de la lumière

"Dès lors que l'entropie d'un rayonnement monochromatique dépend du volume de la même façon que s'il était un milieu discontinu consistant en quanta d'énergie de grandeur  $h\nu$ , le pas évident à franchir est d'investiguer si les lois de l'émission et de la transformation de la lumière sont telles qu'elles puissent être interprétées ou expliquées en considérant que la lumière consiste en de tels quanta. Nous examinerons cette question dans ce qui suit."

Einstein, Ann. D. Phys. 17, 132, 1905

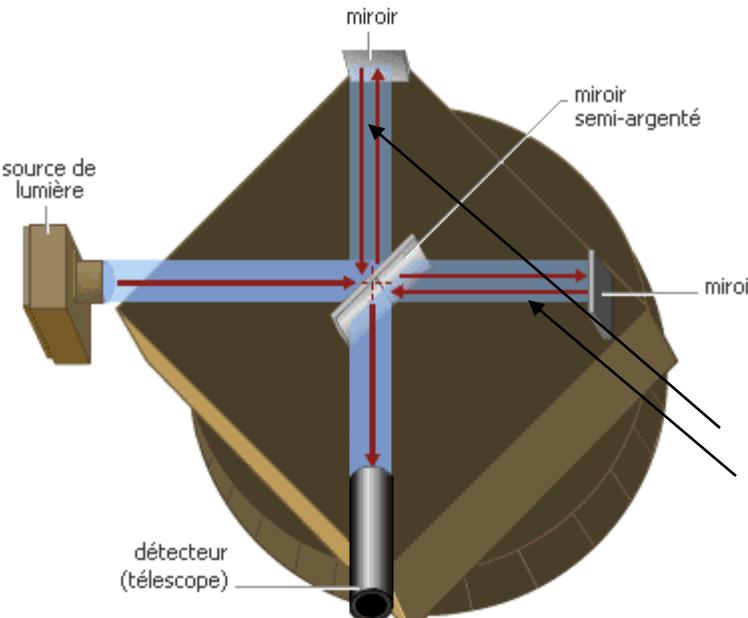
## Le mouvement Brownien (II) et la réalité des atomes



Jean Perrin (Les atomes)

"Si le mouvement discuté ici peut effectivement être observé (en même temps que ses lois), alors la thermodynamique classique ne pourra plus être considérée comme applicable avec précision à des corps visibles au microscope; une détermination exacte des dimensions réelles des atomes sera alors possible. Si, par contre, la prédiction de ce mouvement se révélait incorrecte, alors un argument de poids pourrait être opposé à la théorie cinétique moléculaire de la chaleur." Einstein, Ann. D. Phys. 17, p. 549, 1905

## La relativité restreinte (III)



Expérience de Michelson-Morley  
(1887)  
Interféromètre



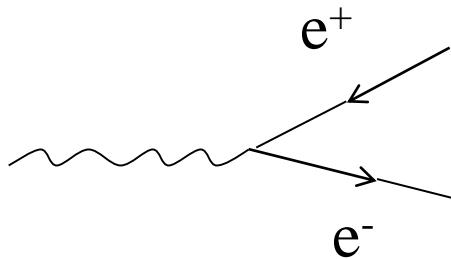
- La lumière se propage dans l'éther (supposé immobile)
- Si la Terre se déplace par rapport à l'éther:
  - les deux rayons lumineux ne devraient *pas avoir la même vitesse* (loi de composition des vitesses)

**Einstein postule que la lumière se propage à une vitesse constante dans le vide (et non pas dans l'éther), indépendamment du référentiel dans lequel on la mesure.**

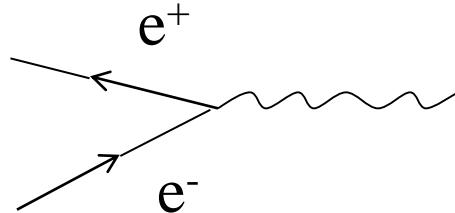
Expérience *cruciale* de la Physique !

# L'antimatière

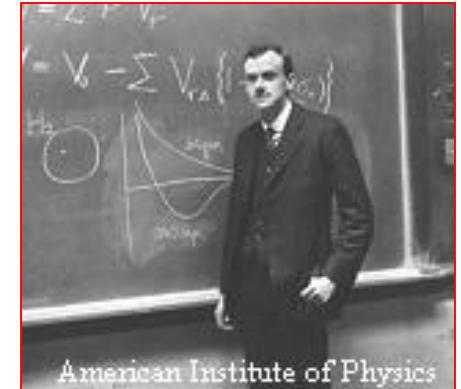
- A partir du vide, on peut produire une particule chargée et produire en même temps son **antiparticule**, identique à elle mais de charge opposée.



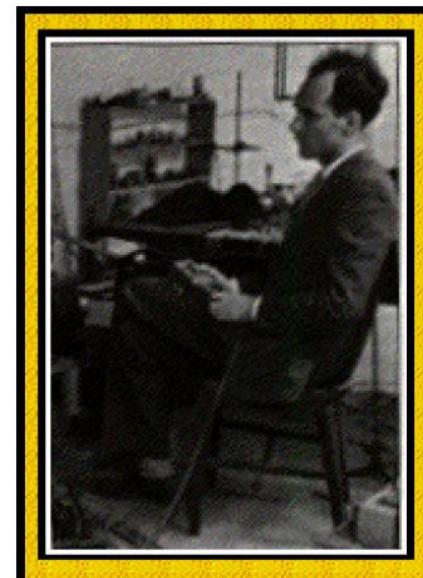
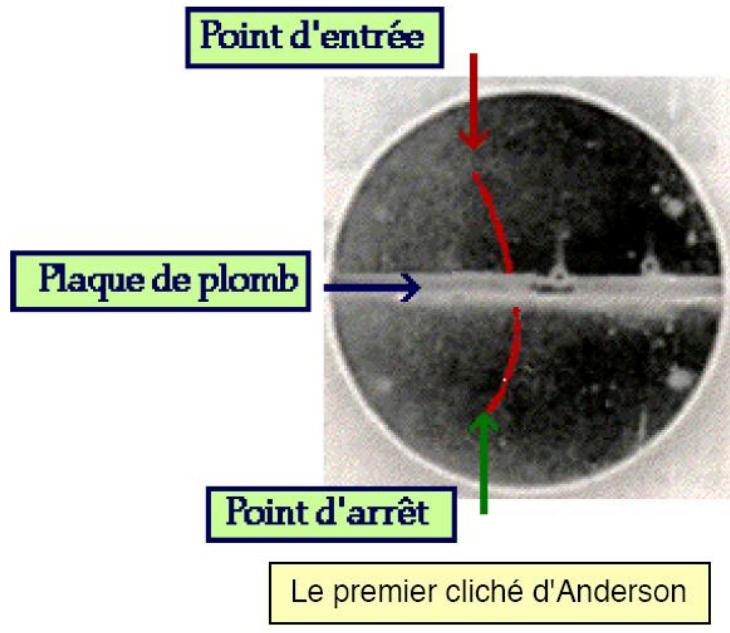
- Lorsqu'une particule et son antiparticule se rencontrent, elles **s'annihilent** dans le vide en émettant des quanta de rayonnement.



- 1928 - Paul Dirac prédit l'antimatière.
  - Il est aussi à l'origine d'une équation fameuse
- 1931 - Anderson découvre le positron dans une chambre de Wilson.
  - En étudiant le rayonnement cosmique, Anderson observe une particule qui pour le spécialiste a toutes les caractéristiques d'un électron, ne peut être un proton et possède une charge électrique positive.



American Institute of Physics



Carl Anderson (1905-1975)

# La découverte du positron (antiparticule de l'électron)

