

2024-2025

Paul-Antoine Hervieux

Cours en ligne:

<https://www.ipcms.fr/paul-antoine-hervieux-2/histoire-de-la-physique-m1/>

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)



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 la Chimie, les Mathématiques etc...) 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. »
- « 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)



QUESTIONS DE SCIENCE

VICTOR

WEISSKOPF

LA RÉVOLUTION
DES QUANTA

HACHETTE



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. Cinq ne sont pas résolus à l'heure actuelle, dont ...la conjecture de Riemann.

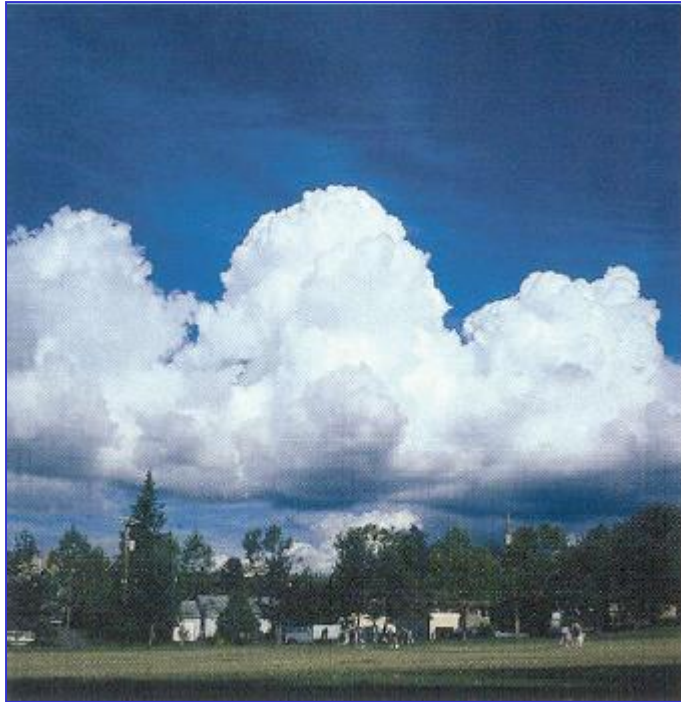
n°	Énoncé du problème	État d'avancement de la résolution du problème	Date de résolution
1 ^{er}	Tout sous-ensemble infini des réels peut être mis en bijection avec l'ensemble des entiers naturels ou avec l'ensemble des réels lui-même.	C'est l'hypothèse du continu, prouvée indécidable (ni sa vérité ni sa fausseté ne peuvent être prouvées) dans la théorie des ensembles de Zermelo-Fraenkel, même avec l'axiome du choix. Néanmoins, celle-ci fait toujours l'objet de recherches dans le cadre d'extensions de la théorie ZFC via l'ajout de nouveaux axiomes comme les axiomes de grands cardinaux ³ .	1963
2 ^e	Peut-on prouver la cohérence de l'arithmétique ? En d'autres termes, peut-on démontrer que les axiomes de l'arithmétique ne sont pas contradictoires ?	Il n'existe pas de consensus sur le fait que les résultats de Gödel et Gentzen apportent une solution au problème tel que formulé par Hilbert. Le théorème d'incomplétude de Gödel, prouvé en 1931, montre qu'aucune preuve de la cohérence ne peut être apportée en utilisant les outils de l'arithmétique. Gentzen, cependant, donna, en 1936, une réponse affirmative au moyen d'une récurrence transfinie.	1936 ?
3 ^e	Étant donnés deux polyèdres d'égal volume, peut-on découper le premier polyèdre en des polyèdres et les rassembler pour former le second polyèdre ?	Résolu par la négative. Les deux polyèdres doivent avoir les mêmes invariants de Dehn.	1900
4 ^e	Définir toutes les géométries dont les géodésiques sont les droites.	Trop vague pour être déterminé résolu ou non ^{HZ} .	
5 ^e	Démontrer que les groupes de Lie sont nécessairement différentiables.	Résolu par Andrew Gleason, selon une certaine interprétation donnée à la formulation. Si, toutefois, il peut être interprété comme conjecture de Hilbert-Smith (en), il n'est toujours pas résolu.	1953 ?
6 ^e	Axiomatisation, fondée sur le modèle mathématique, de la physique.	Non résolu.	
7 ^e	Démontrer la transcendance des nombres a^b , avec a algébrique différent de 0 et 1, et b algébrique irrationnel.	Résolu. Résultat : démontré, par le Théorème de Gelfond-Schneider.	1935
8 ^e	Démontrer trois conjectures : — l'hypothèse de Riemann ; — la conjecture de Goldbach ; — la conjecture des nombres premiers jumeaux.	Non résolu.	
9 ^e	Établir une loi de réciprocité dans les corps de nombres.	Partiellement résolu. Il est résolu dans le cas abélien, par le développement de la théorie des corps de classes. Si l'on interprète le problème comme suffisamment vaste pour intégrer les cas non abéliens (en), alors il reste non résolu.	
10 ^e	Trouver un algorithme déterminant si une équation diophantienne a des solutions.	Résolu par la négative. Le théorème de Matiyasevich implique qu'il n'existe pas de tel algorithme.	1970
11 ^e	Classer les formes quadratiques à coefficients dans les corps de nombres.	En partie résolu par le principe local-global de Helmut Hasse et Carl Siegel ⁴ .	(a) 1923 (b) 1930

12 ^e	Prolonger le théorème de Kronecker-Weber à tous les corps de nombres.	Non résolu.	
13 ^e	Montrer l'impossibilité de résoudre les équations du septième degré au moyen de fonctions continues de seulement deux variables.	Résolu. Réfuté par Vladimir Arnold, d'après les travaux d'Andreï Kolmogorov.	1957
14 ^e	Prouver le caractère fini de certains systèmes complets des fonctions.	Résolu par la négative. Contre-exemple construit par Masayoshi Nagata.	1959
15 ^e	Mettre en place les bases du calcul énumératif de Schubert.	Résolu par Bartel Leendert van der Waerden ⁴	1930
16 ^e	Décrire les positions relatives des branches de courbes algébriques réelles et des cycles limites d'un champ de vecteurs à deux dimensions.	Non résolu.	
17 ^e	Montrer qu'une fonction rationnelle positive peut s'écrire sous la forme de somme de carrés de fonctions rationnelles.	Résolu par Emil Artin. Résultat : oui.	1927
18 ^e	(a) Existe-t-il un polyèdre acceptant seulement un pavage non-isoédrique en trois dimensions ? (b) Quel est l'empilement compact de sphères le plus dense ?	(a) Résolu par Karl Reinhardt (de). Résultat : oui. (b) Résolu par Thomas Hales. Résultat : empilement cubique et hexagonal, qui ont une densité d'à peu près 74 %.	(a) 1928 (b) 1998
19 ^e	Prouver que le calcul des variations est toujours nécessairement analytique.	Résolu, Résultat : oui, résolu par Bernstein (1904) ⁴ , prouvé par Ennio De Giorgi et, indépendamment et par d'autres méthodes, par John Forbes Nash	1957
20 ^e	Tous les problèmes du calcul des variations avec des conditions aux limites appropriées ont-ils des solutions ?	Résolu ⁴ . Un sujet important de recherche durant tout le xx ^e siècle, incluant des solutions pour les cas non linéaires.	xx ^e siècle
21 ^e	Prouver que toute représentation complexe de dimension finie peut s'obtenir par action de monodromie sur une équation différentielle de Fuchs.	Résolu par Helmut Rörli pour la formulation la plus commune. Résolu négativement par Dmitri Anossov et Andreï Bolobroukh ⁴ .	(a) 1957 (b) 1989
22 ^e	Uniformiser des courbes analytiques au moyen de fonctions automorphes (en).	Résolu par Paul Koebe et Henri Poincaré.	1907
23 ^e	Développer une méthode générale de résolution dans le calcul des variations.	Non résolu.	

Le mot science vient du mot latin scientia de *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^{ème})

Pourquoi les nuages sont-ils
blancs ou gris ?

(Mie début du XX^{ème})



Gustav Mie

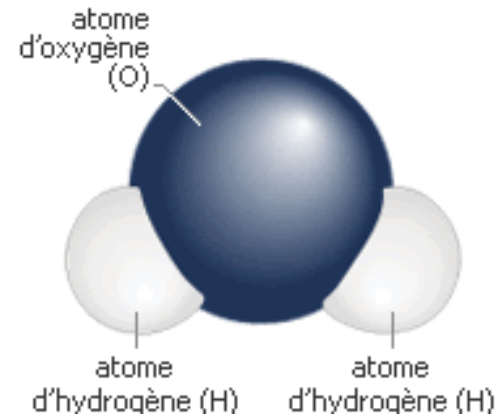
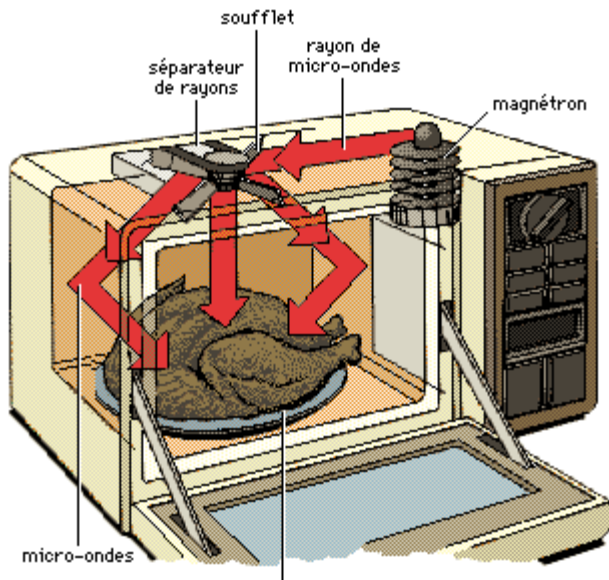


Lord Rayleigh



© Kamila Mazurkiewicz-Osiak

Comment ça marche ?



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

→ Rotation des molécules d' H_2O

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

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

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

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

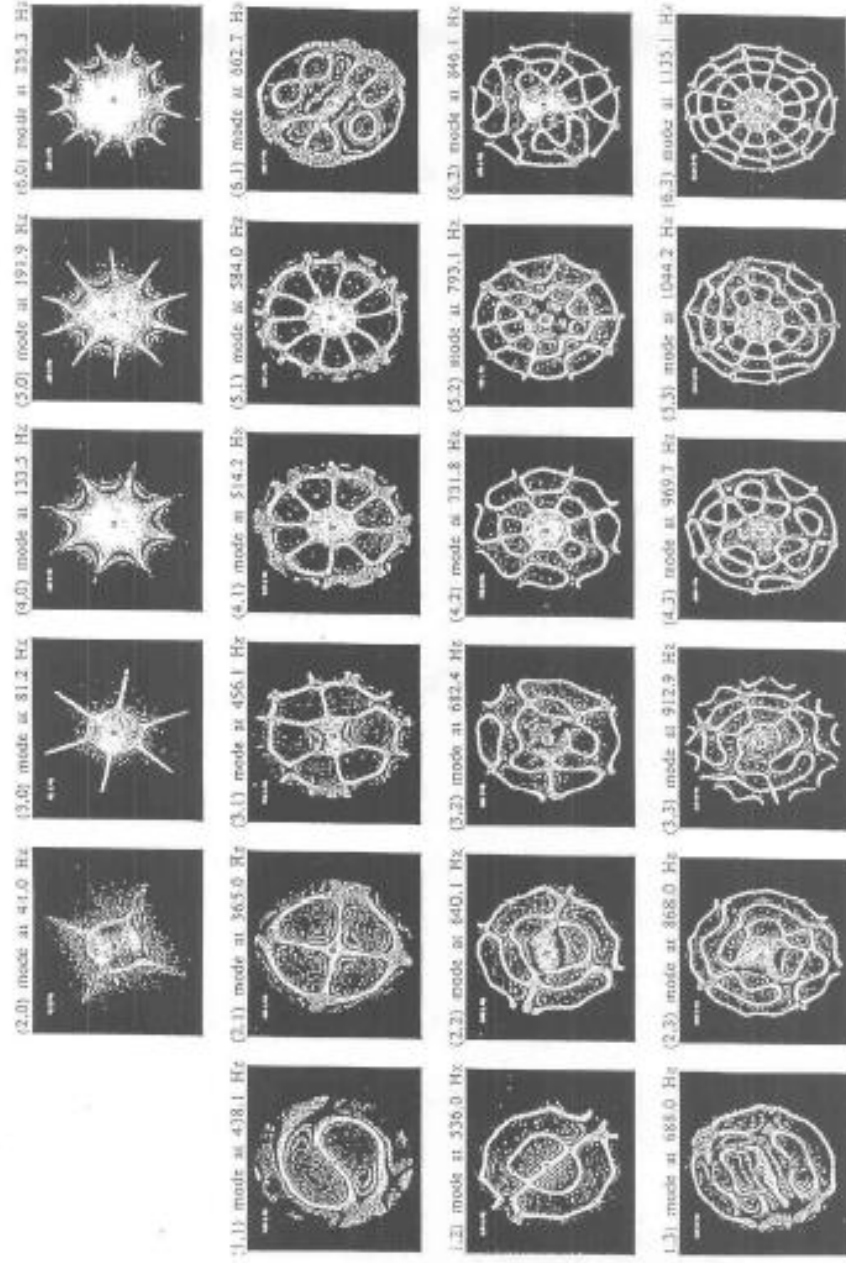
—	$f_{20} = 0.2413c_L h/a^2$	$f_{30} = 2.328f_{20}$	$f_{40} = 4.11f_{20}$	$f_{50} = 6.30f_{20}$
$73f_{20}$	$f_{11} = 3.91f_{20}$	$f_{21} = 6.71f_{20}$	$f_{31} = 10.07f_{20}$	$f_{41} = 13.92f_{20}$
$34f_{20}$	$f_{12} = 11.40f_{20}$	$f_{22} = 15.97f_{20}$	$f_{32} = 21.19f_{20}$	$f_{42} = 27.18f_{20}$
				$f_{52} = 33.31f_{20}$

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

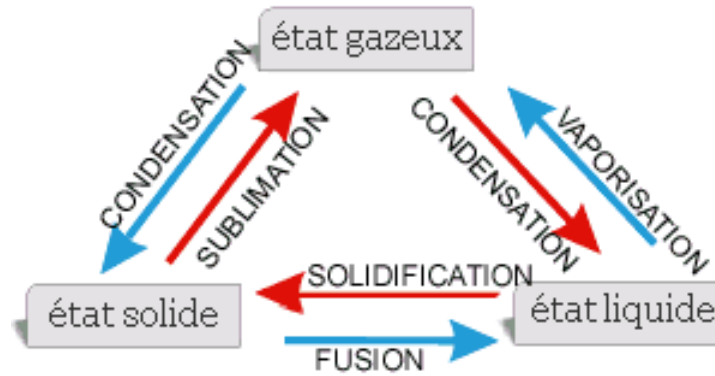
$f_{01} = 0.2287c_L h/a^2$	$f_{11} = 2.80f_{01}$	$f_{21} = 5.15f_{01}$
$f_{02} = 5.98f_{01}$	$f_{12} = 9.75f_{01}$	$f_{22} = 14.09f_{01}$
$f_{03} = 14.91f_{01}$	$f_{13} = 20.66f_{01}$	$f_{23} = 26.99f_{01}$



Modes of an 18 inch Medium Crash Cymbal



Transitions de phases...



Pour commencer

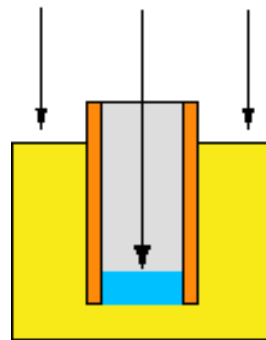
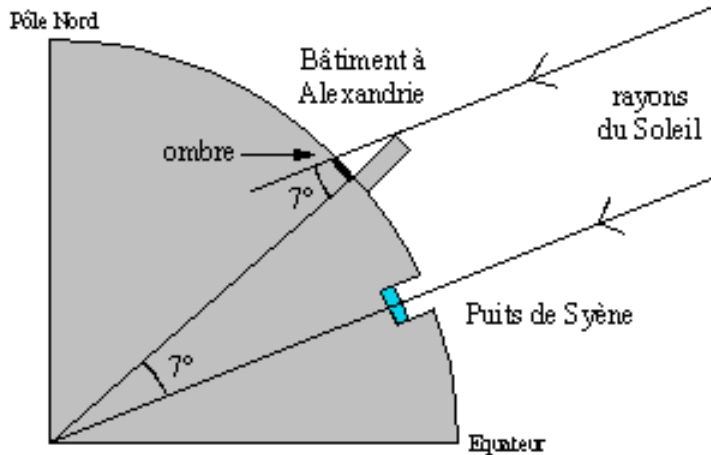
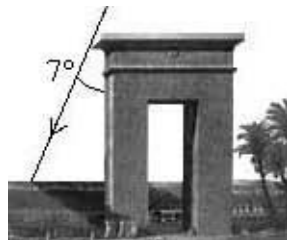
Quelques faits marquants dans l'histoire de la physique...

- 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'Égypte 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 à midi (zénith) dans deux villes



Tropique du Cancer
Écliptique: $23^{\circ}27'$

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

(40349 km à comparer à 40074 km actuellement mesurés)

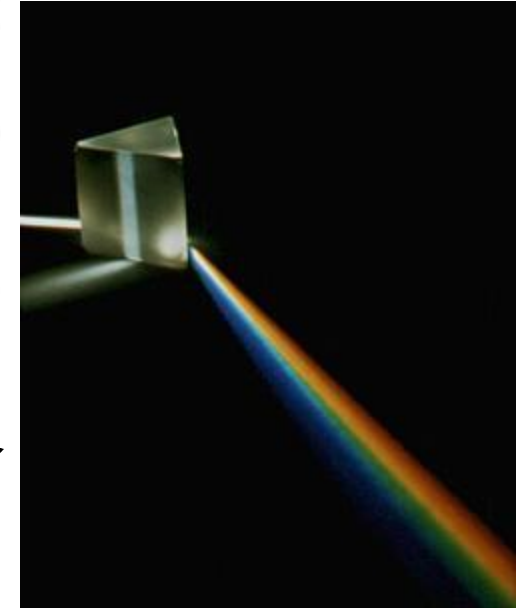
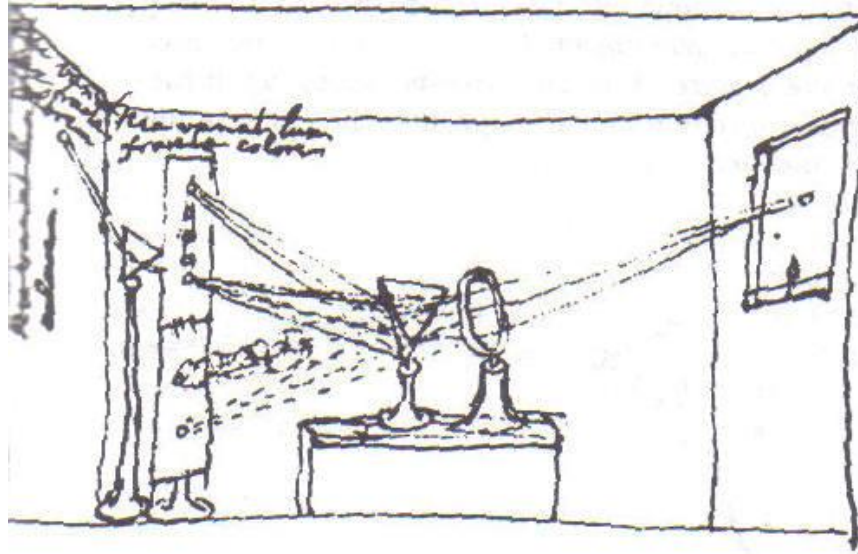
Méthode historique d'Eratosthène

$\tan \alpha = \frac{l}{h} \Rightarrow \alpha = 7^\circ$

$P = 2\pi R \rightarrow 360^\circ$
 $l \rightarrow 7^\circ \Rightarrow P = 41143 \text{ km}$
 $\Rightarrow R = 6518 \text{ km}$

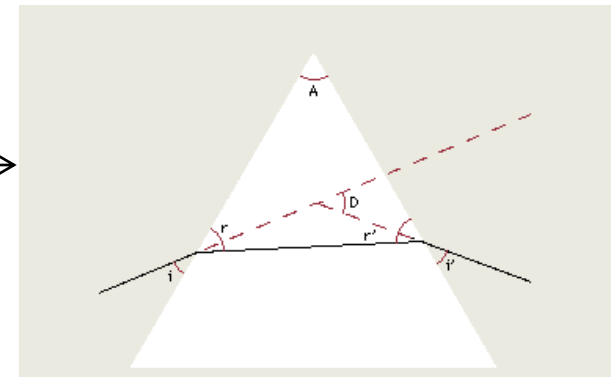
$l \approx 5000 \text{ stades} \approx 800 \text{ km}$

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.

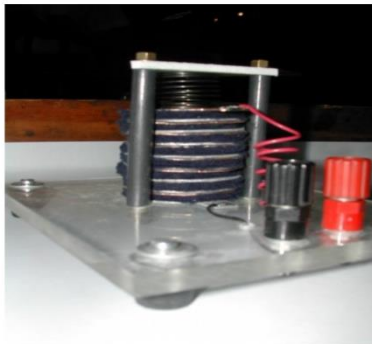


En 1800 la pile de Volta (1745-1827)



← 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)

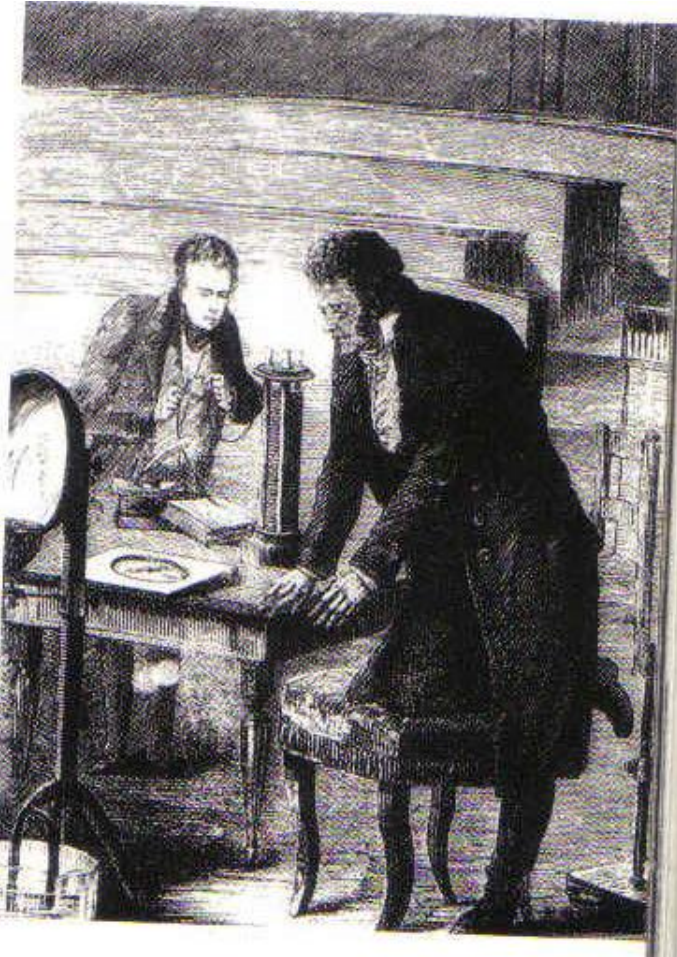


← Version moderne

Première source d'énergie électrique de l'histoire !!

Hans Christian Oersted (1820)

Un courant est capable de faire dévier une aiguille aimantée

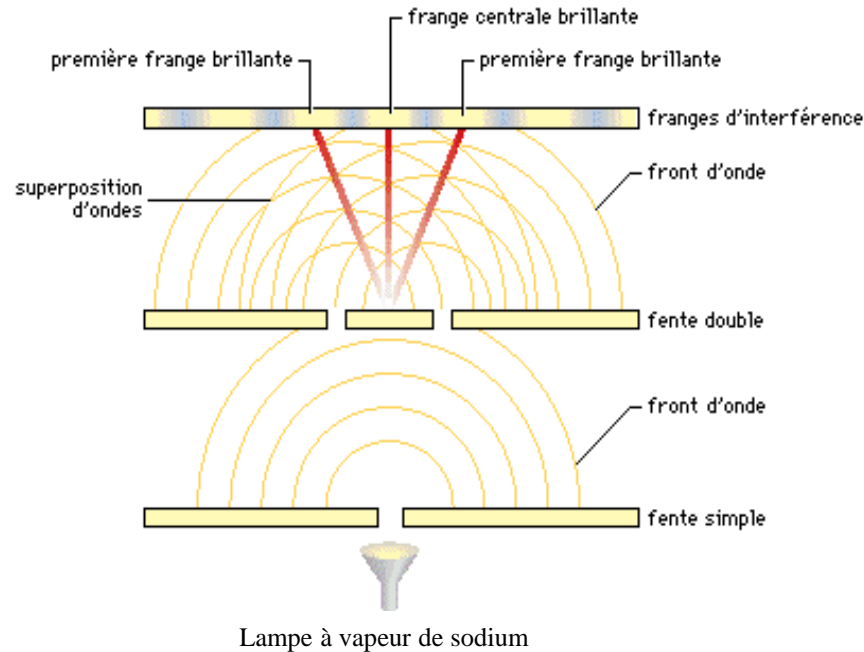


- Expérience **fondatrice** de

l'électromagnétisme

- Avant, le magnétisme et l'électricité étaient considérés comme **totallement indépendants**

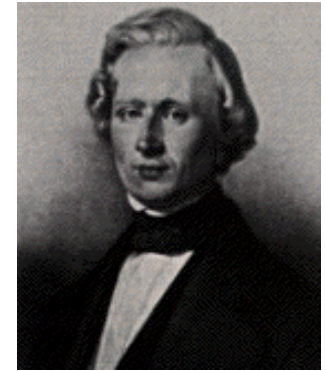
Le fentes de Thomas Young (1801)



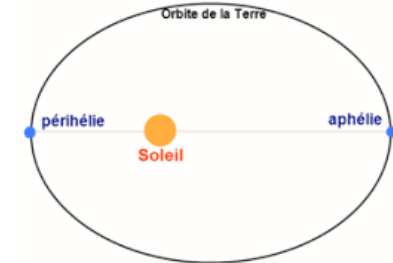
Nature ondulatoire de la lumière

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 inexplicés.
- 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 prédit 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**.



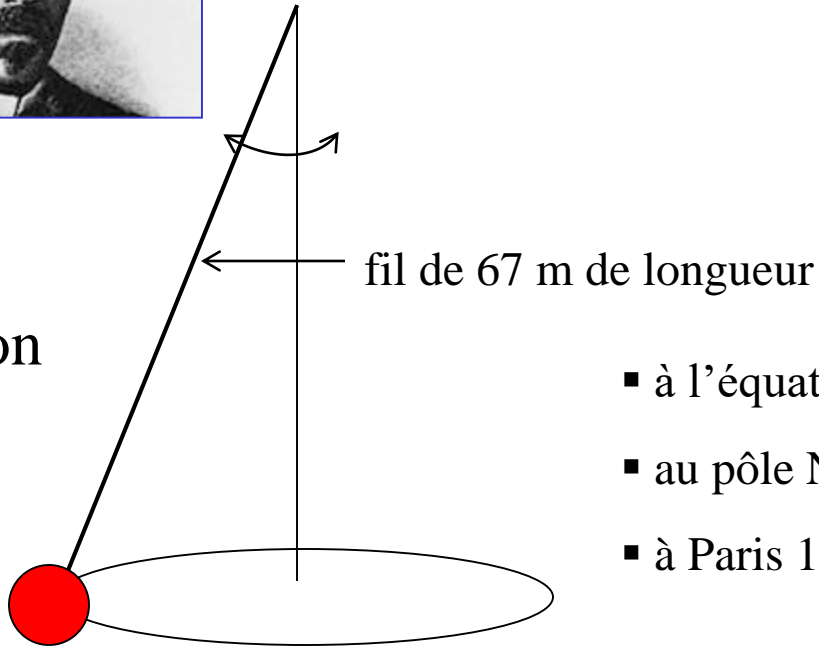
- Le seul désaccord irréductible que Le Verrier relevait dans la comparaison entre l'observation et les orbites calculées était un résidu de 38" pour le mouvement séculaire du **périhélie de Mercure**. C'est précisément ce résidu, confirmé et à peine modifié, qui devait fournir un demi-siècle plus tard la première preuve matérielle de la théorie de la **relativité générale**.



Le pendule de Foucault (1851)



Panthéon



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

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

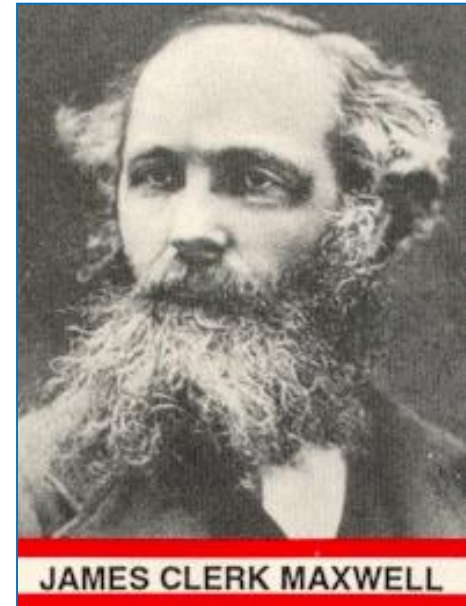
→ La terre ne constitue pas un *référentiel galiléen*

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

Albert Einstein

$$\begin{aligned}\vec{\nabla} \wedge \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\ \vec{\nabla} \cdot \vec{B} &= 0 \\ \vec{\nabla} \cdot \vec{E} &= \frac{\rho}{\epsilon_0} \\ \vec{\nabla} \wedge \vec{B} &= \mu_0 \vec{j} + \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}\end{aligned}$$

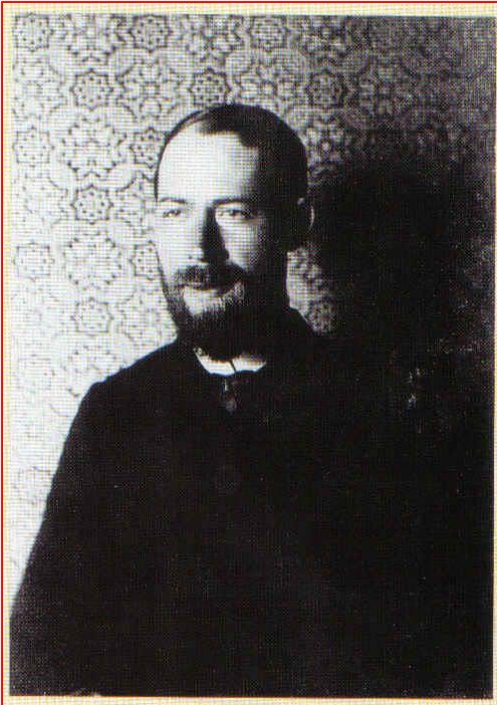
(1873)



« *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)

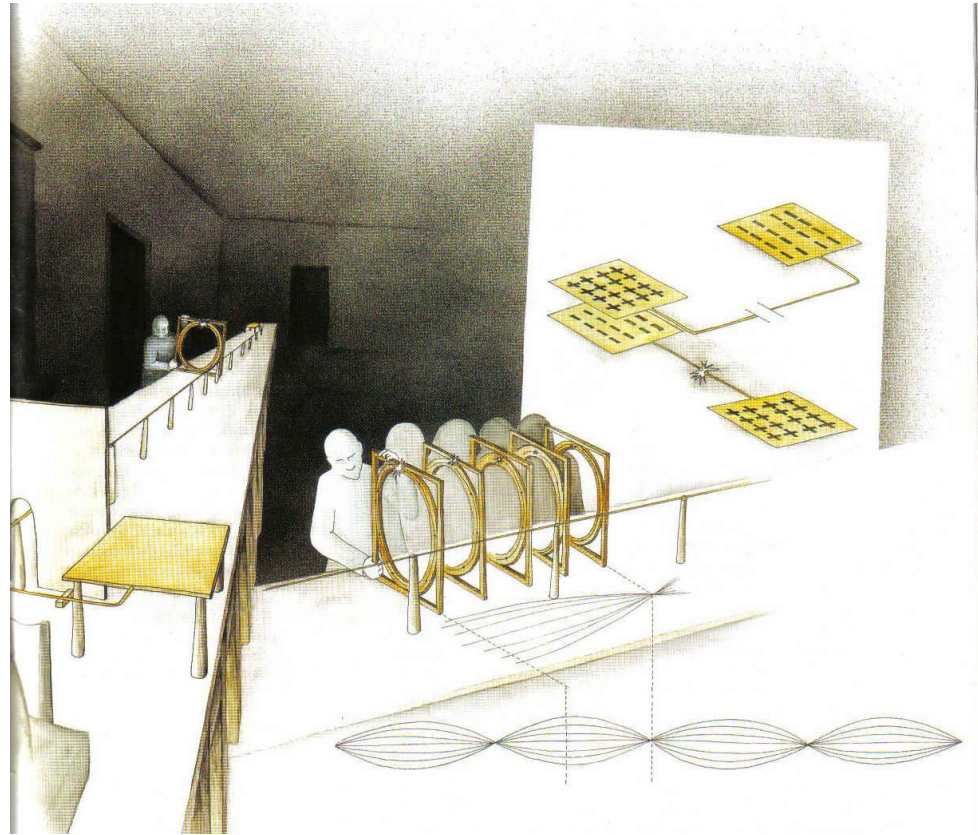
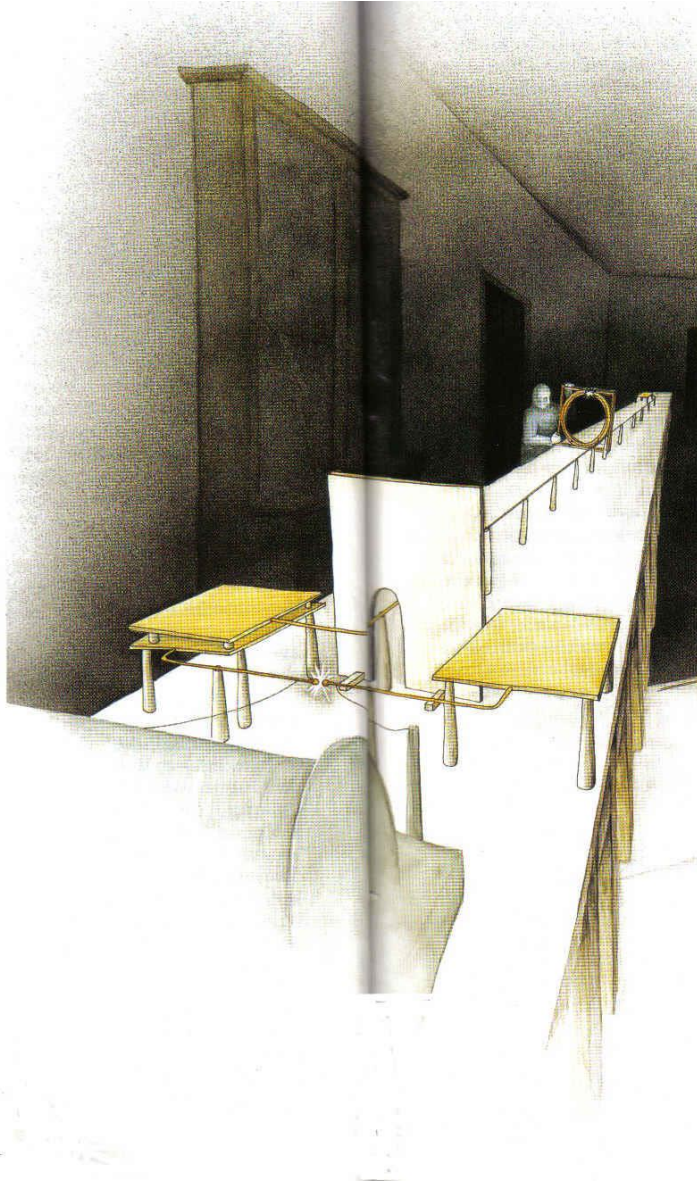
Lieu: Ecole supérieure technique de **Karlsruhe**
élève de Hermann von Helmholtz (Berlin)



« *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)





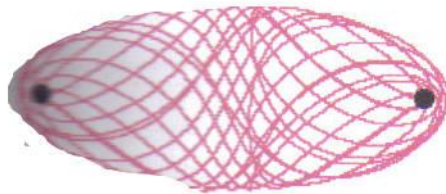
Fin du XIX, à l'orée de la relativité...

Henri **Poincaré** (1854-1912)

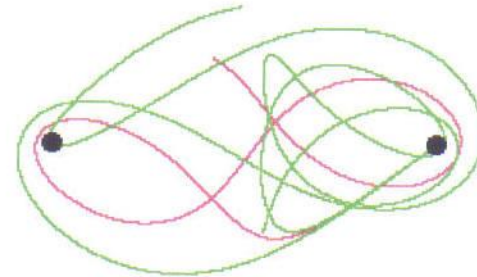
- l'un des pères de la relativité restreinte
- Propage les idées de Maxwell en France
- Problème des 3 corps



Systeme dynamique → Chaos

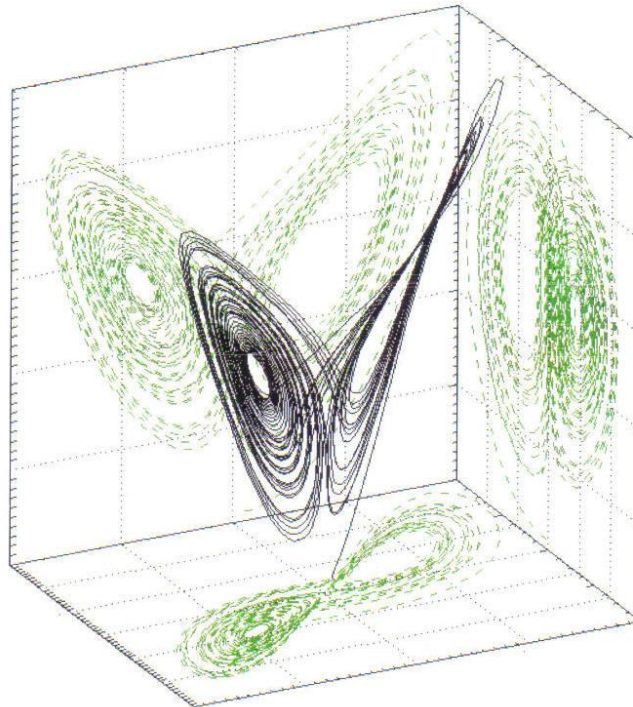


Mouvement complexe des 3 corps

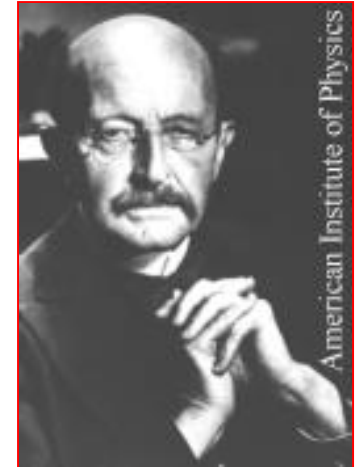
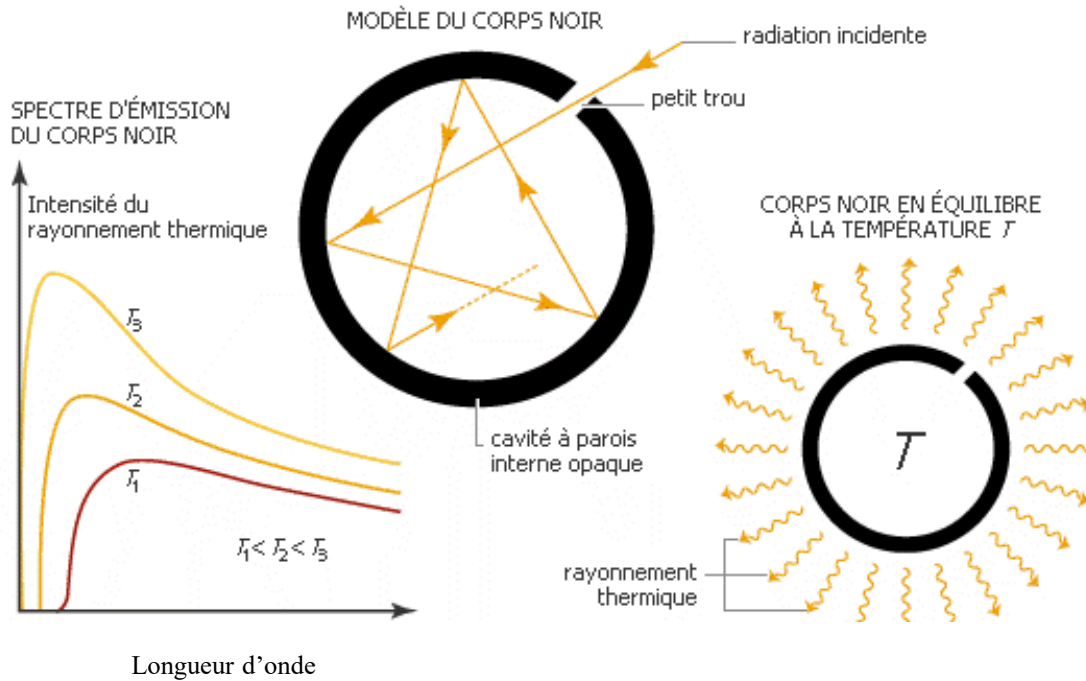


Sensibilité aux conditions initiales
→ Chaos

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



Le corps noir (1900)



Max Planck
(1900)

Black-Body
Theory and
the Quantum
Discontinuity,
1894-1912

THOMAS S. KUHN

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.

Note: Gaston Bachelard → Alexandre Koyré → TK



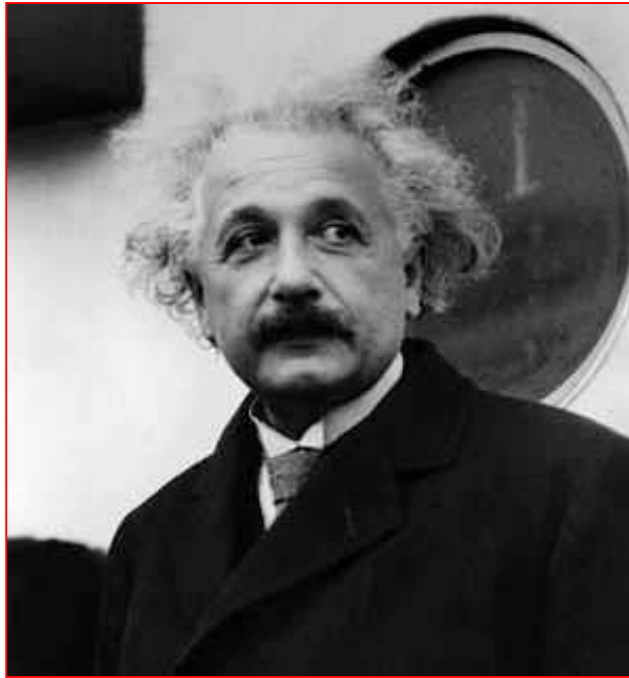


1905: Une année de folie ...

[Einstein] 1905, l'année admirable
Michel Paty

À 26 ans, Einstein publie quatre articles qui apportent des solutions à des problèmes de physique parfois centenaires et ouvrent la voie à une nouvelle physique, encore féconde 100 ans plus tard.

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



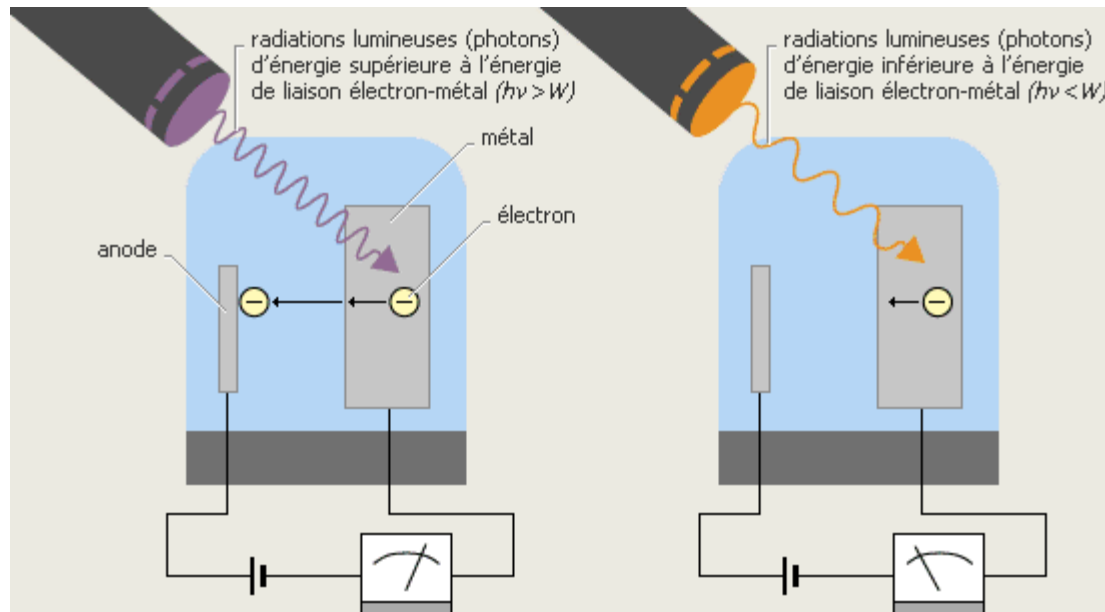
Albert Einstein (1879-1955)

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

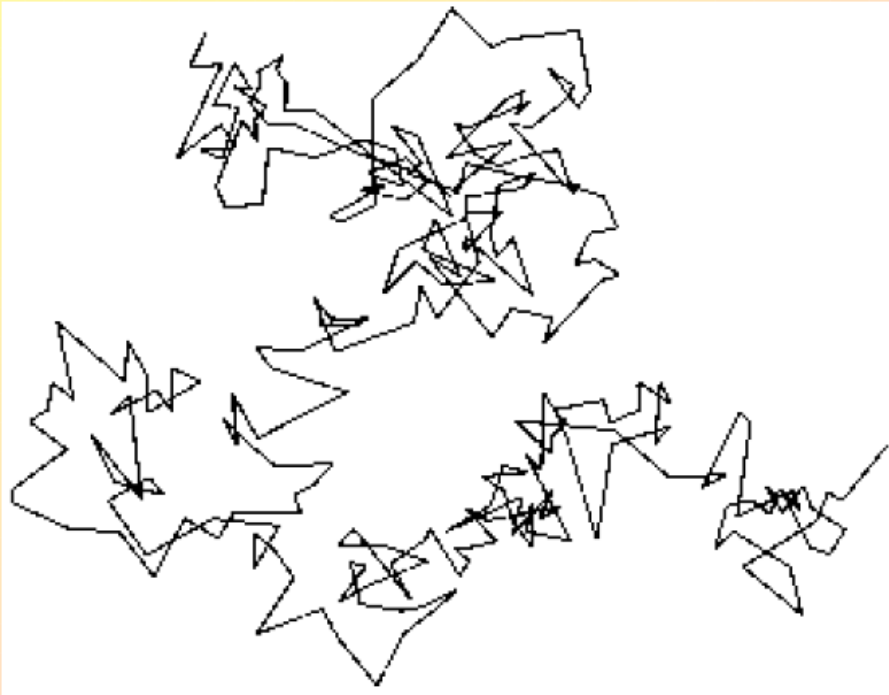
Les quanta de lumière et l'effet photoélectrique

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

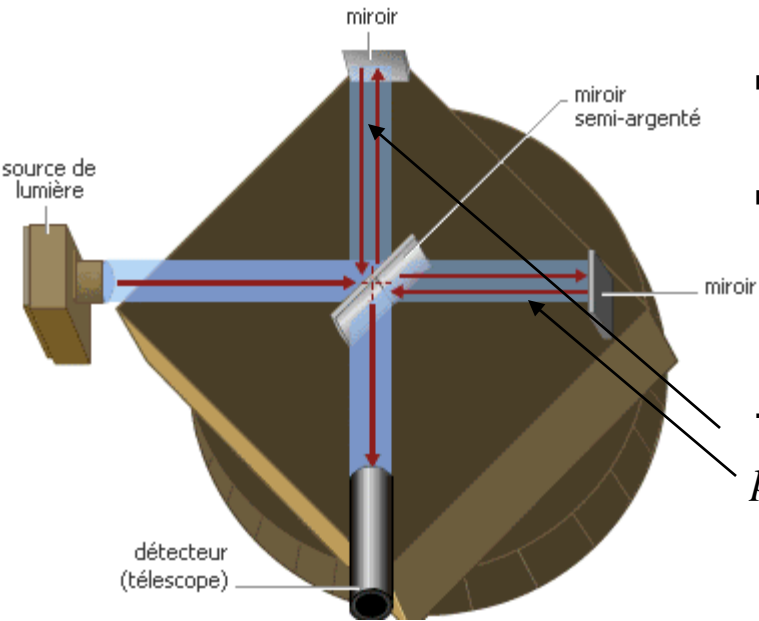
Le mouvement Brownien (II) et la réalité des atomes



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)



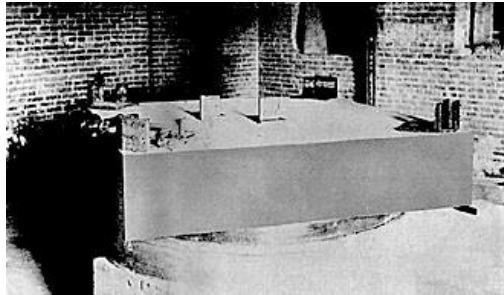
- La lumière se propage dans l'éther (supposé immobile)
- Si la Terre se déplace par rapport à l'éther:
→ les deux rayons lumineux ne devraient pas avoir la même vitesse (loi de composition des vitesses).

Expérience de Michelson-Morley
(1887)
Interféromètre

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.



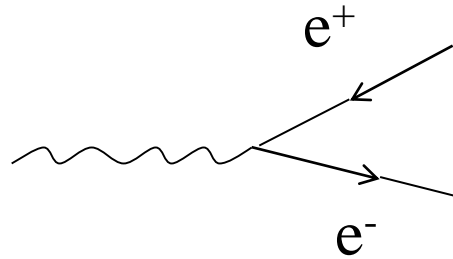
Prix Nobel en 1907



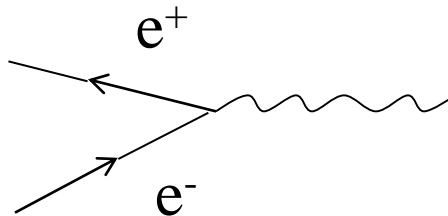
Expérience *cruciale* de la Physique !

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.

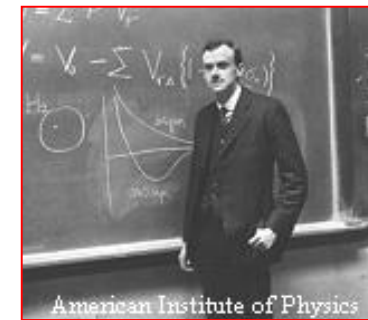


- Lorsqu'une particule et son antiparticule se rencontrent, elles **s'annihilent** dans le vide en émettant des quanta de rayonnement.

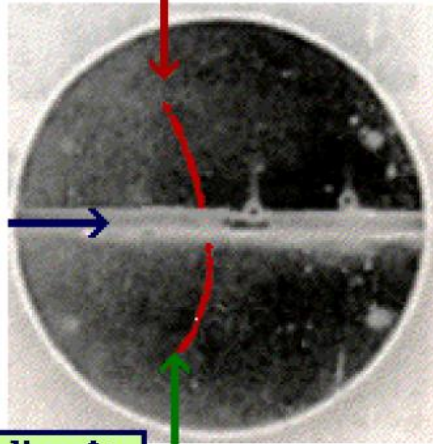


- 1928 - Paul Dirac prédit l'antimatière.
 - Il est aussi à l'origine d'une équation fameuse
- 1931 - Anderson découvre le positron dans une chambre de Wilson.

- 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.



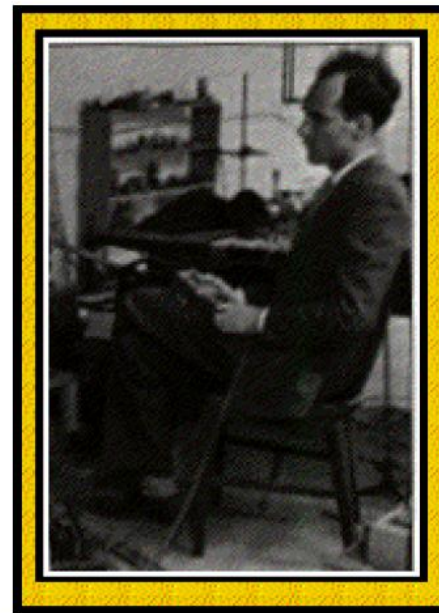
Point d'entrée



Plaque de plomb

Point d'arrêt

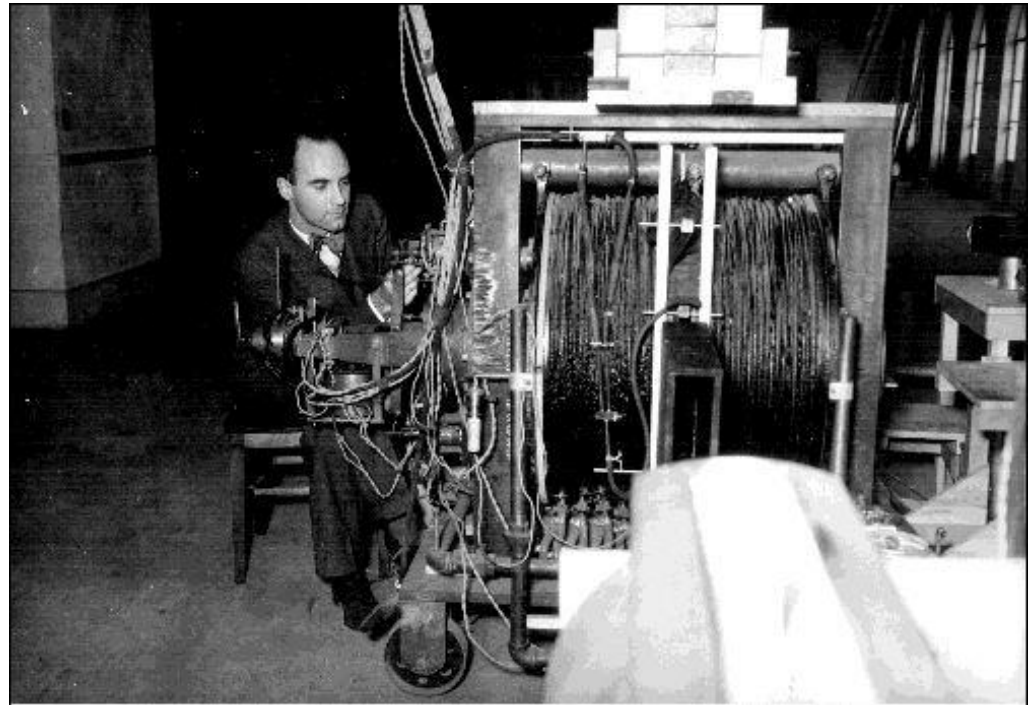
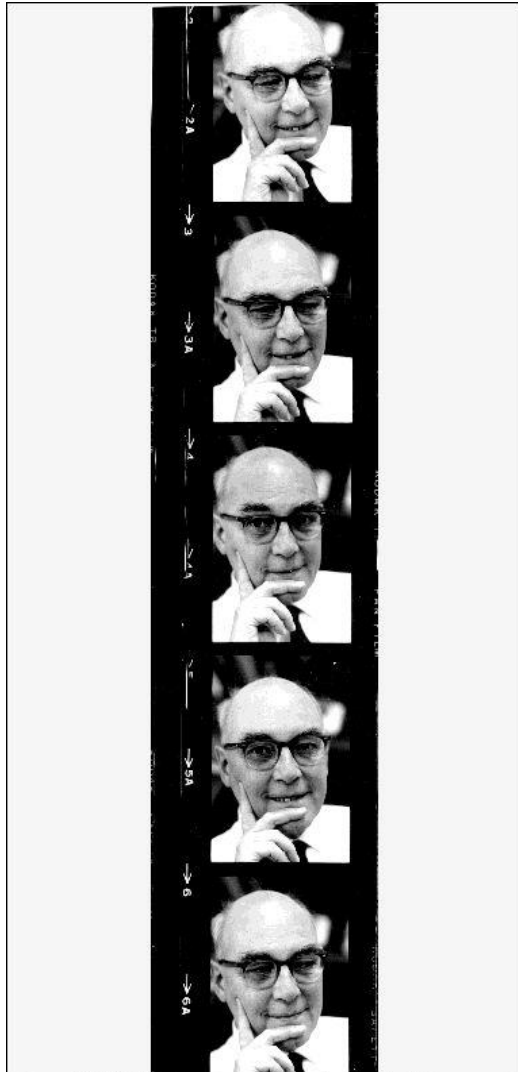
Le premier cliché d'Anderson

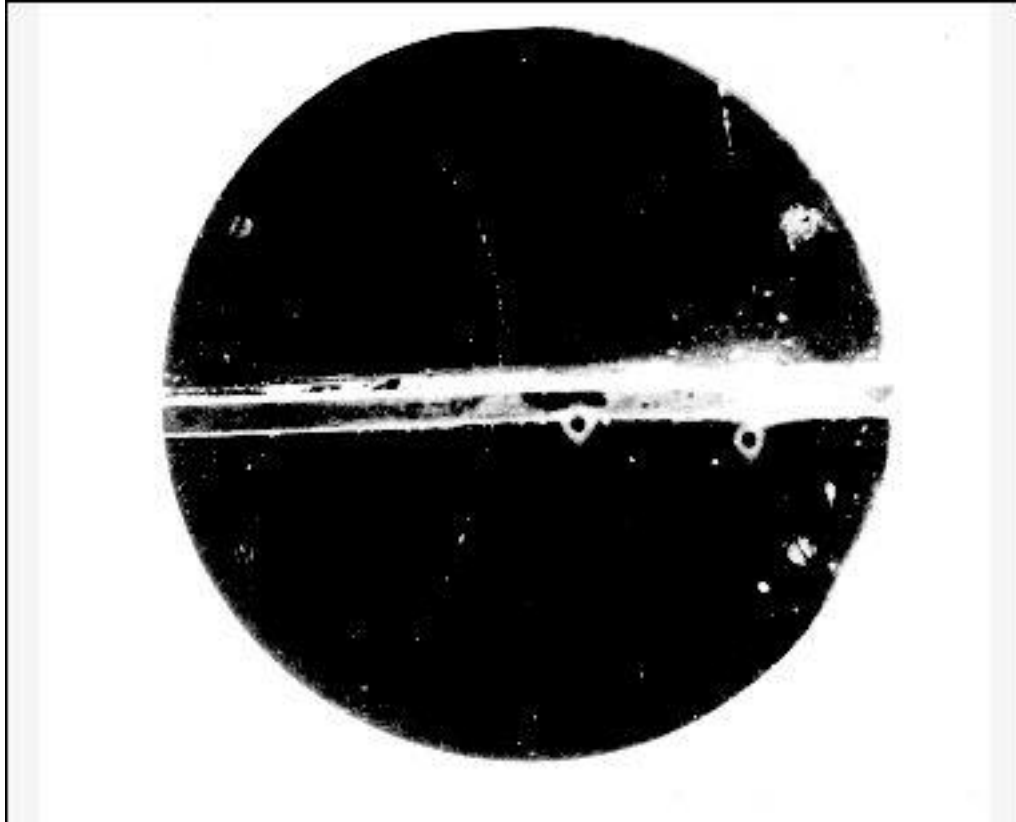


Carl Anderson (1905-1975)

Le rayonnement cosmique est principalement constitué de particules chargées : protons (88 %), noyaux d'hélium (9 %), antiprotons, électrons, positrons et particules neutres (rayons gamma, neutrinos et neutrons). La source de ce rayonnement se situe selon les cas dans le Soleil, à l'intérieur ou à l'extérieur de notre galaxie.

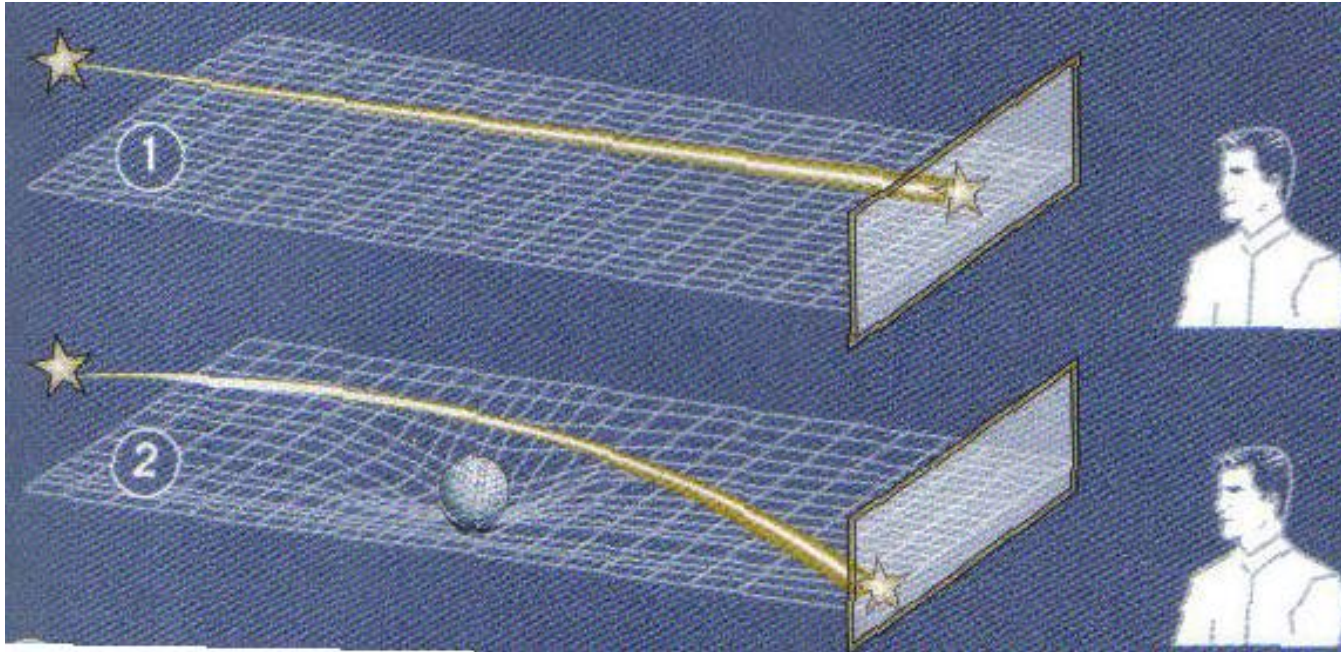
La découverte du positron (antiparticule de l'électron)





Einstein's theory of gravity (1916)

A new concept of space-time



- Gravity is the result of distortions in space-time created by mass and energy
- Light follows the geodesics of this **Riemann** space

1919 Expedition: **Arthur Eddington**

A wonderful story ...

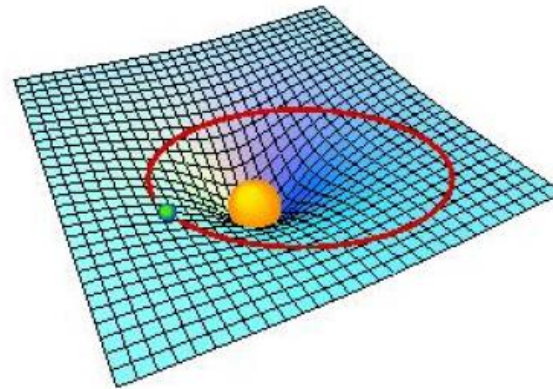


Théorie de la gravitation générale (1916)

VIRGO

vérifier la théorie de la relativité d'Einstein...

gravitation = courbure de l'espace-temps



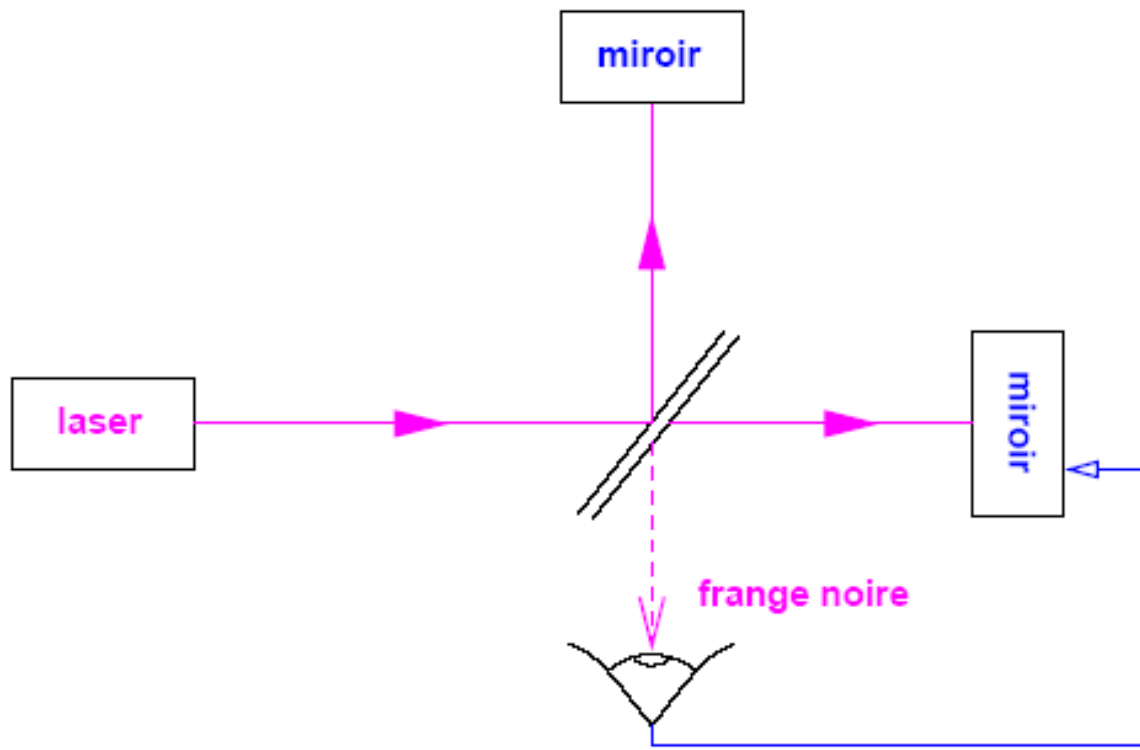
onde gravitationnelle = petite perturbation (“vaguelette”) qui se propage à la vitesse de la lumière

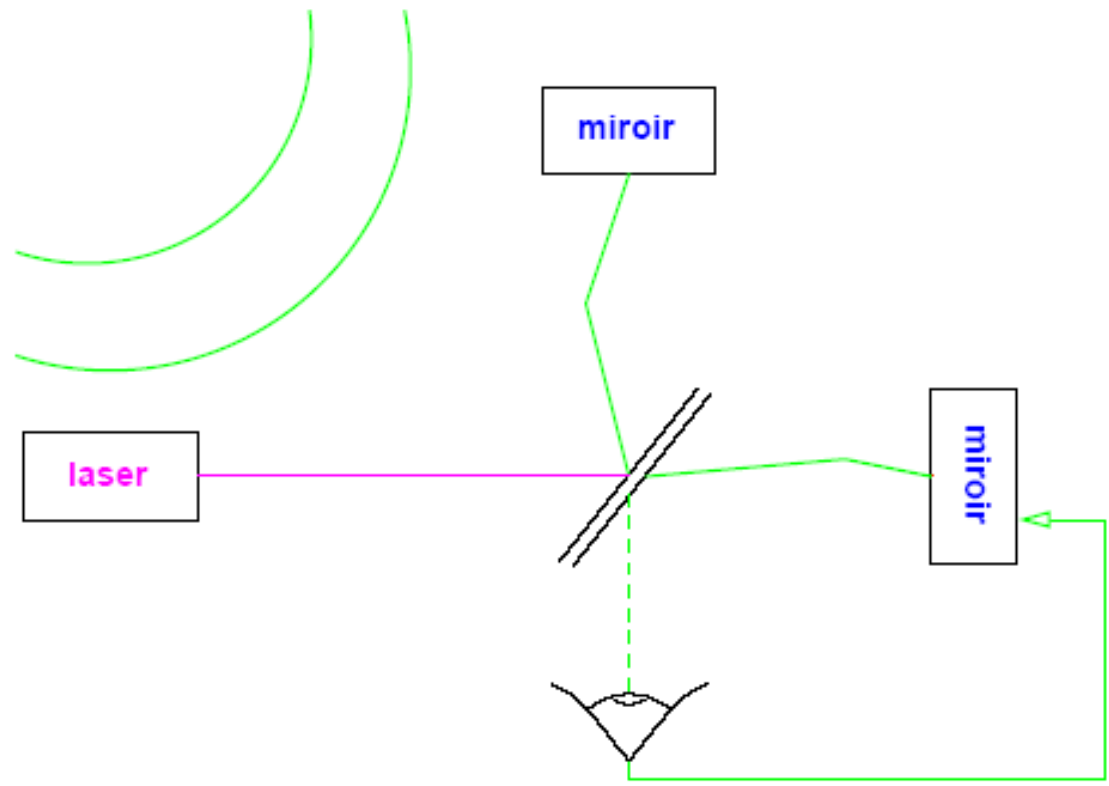
- L'existence **d'ondes gravitationnelles** est prédite par la théorie de la relativité générale: des masses en mouvement les unes par rapport aux autres pourraient perdre une partie de leur énergie, qui serait émise dans l'espace sous la forme d'ondes avec une vitesse proche de celle de la lumière.
- Parmi les sources possibles des ondes gravitationnelles, on peut citer les explosions de supernovae, les trous noirs agissant les uns sur les autres, les pulsars (étoiles à neutrons en rotation) et les systèmes binaires d'étoiles neutroniques, lorsque leurs composants fondent puis disparaissent.

Plusieurs équipes réunissant des milliers de chercheurs sont à la traque des ondes gravitationnelles depuis des décennies. Deux grands instruments de détection ont été développés: LIGO (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory) aux États-Unis, et Virgo en Europe (en Italie près de Pise). La première détection d'ondes gravitationnelles a été réalisée le 14 septembre 2015 par LIGO, avec l'aide de l'équipe Virgo pour l'analyse des données.

Détection des ondes gravitationnelles

detecteur interferometrique d'OG = Michelson





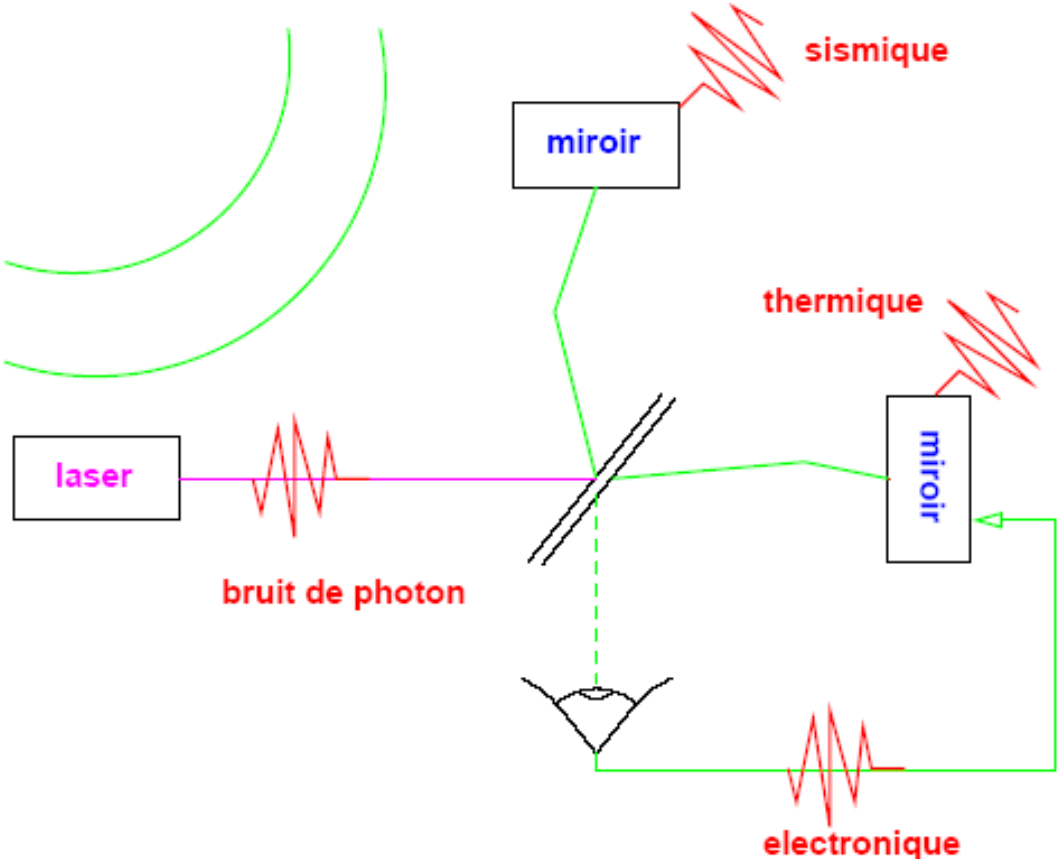
mesure precise de $\Delta l = L_2 - L_1$

detecte le changement de phase

Détection des ondes gravitationnelles (4): bruits



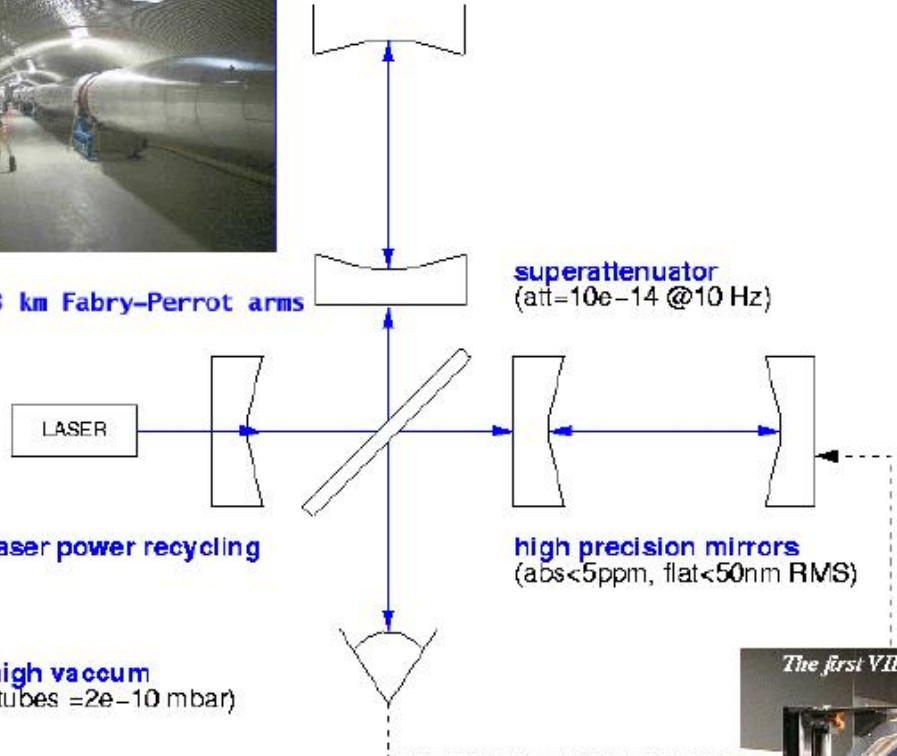
source d'OG



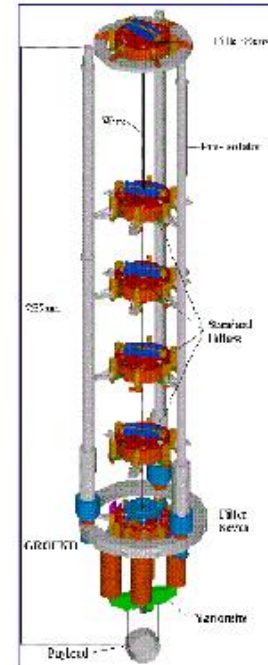
Défis technologiques



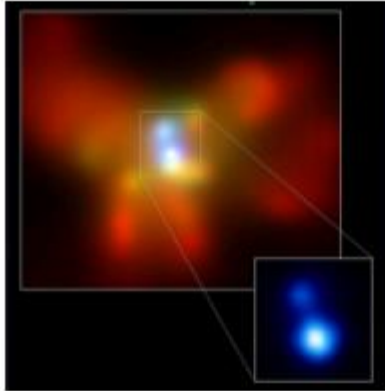
3 km Fabry-Perrot arms



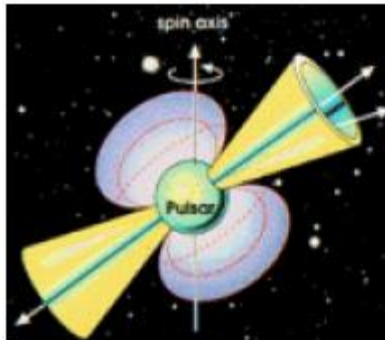
high vacuum
(tubes = 2×10^{-10} mbar)



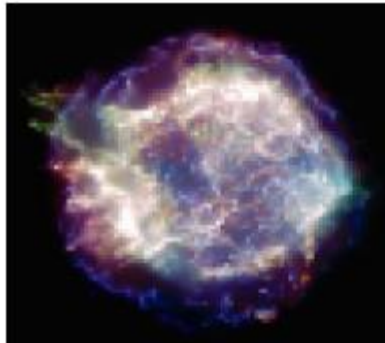
Sources astrophysiques



binaires d'objets compacts

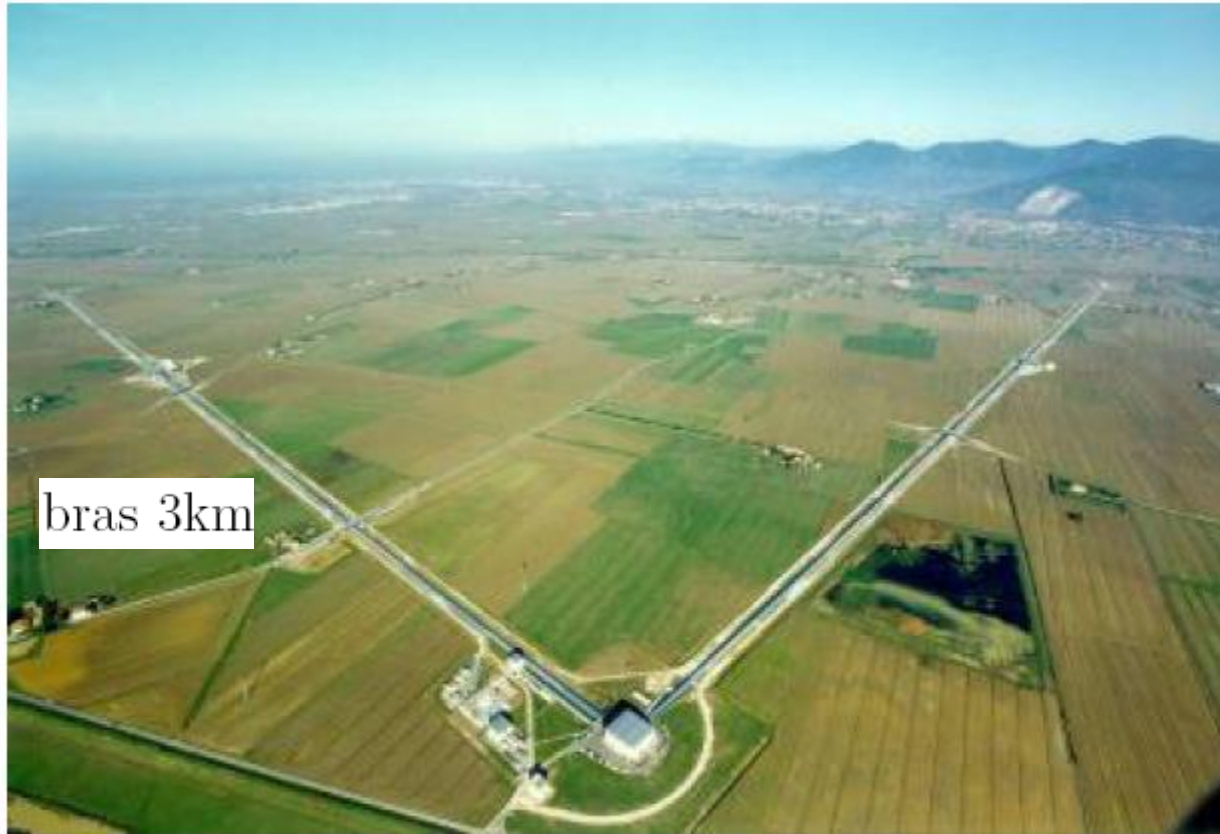


étoiles neutroniques (excentricité)



supernovae

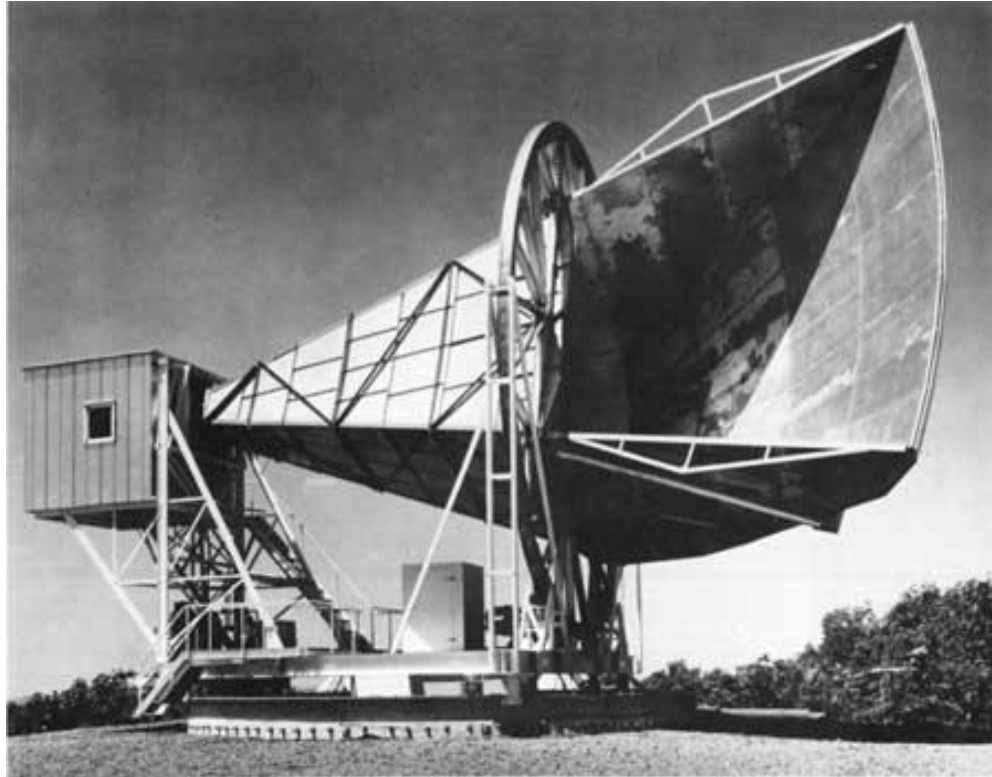
La recherche fondamentale permet de faire des avancées technologiques importantes et innovantes.



localisation: Cascina, près de Pise (Italie)

le rayonnement fossile (1965)

2.7 K



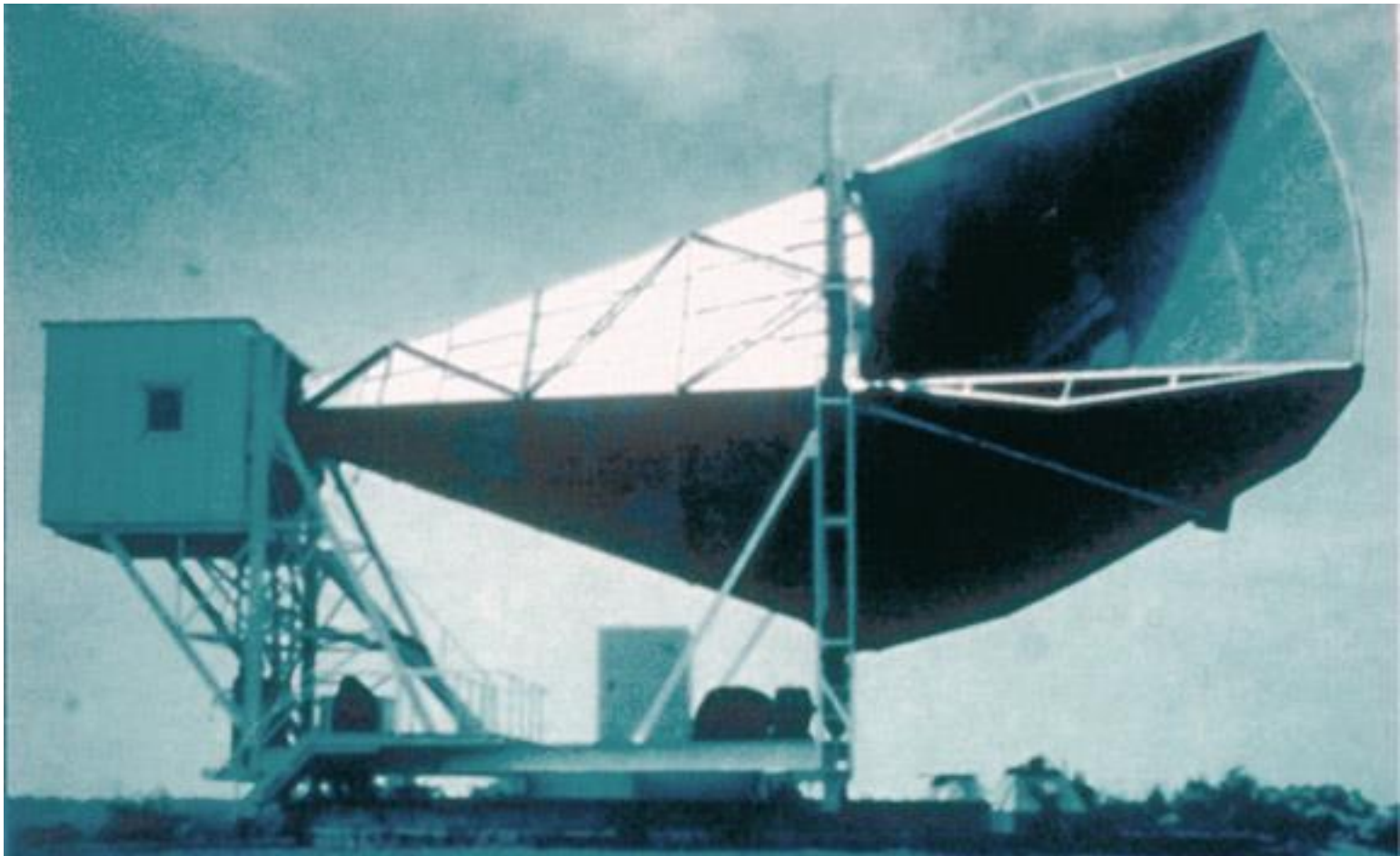
L'antenne des laboratoires Bell à Holmdel où Arno **Penzias** et Robert **Wilson** découvrirent le rayonnement fossile en 1965.

Le bruit primordial

Cosmic microwave background

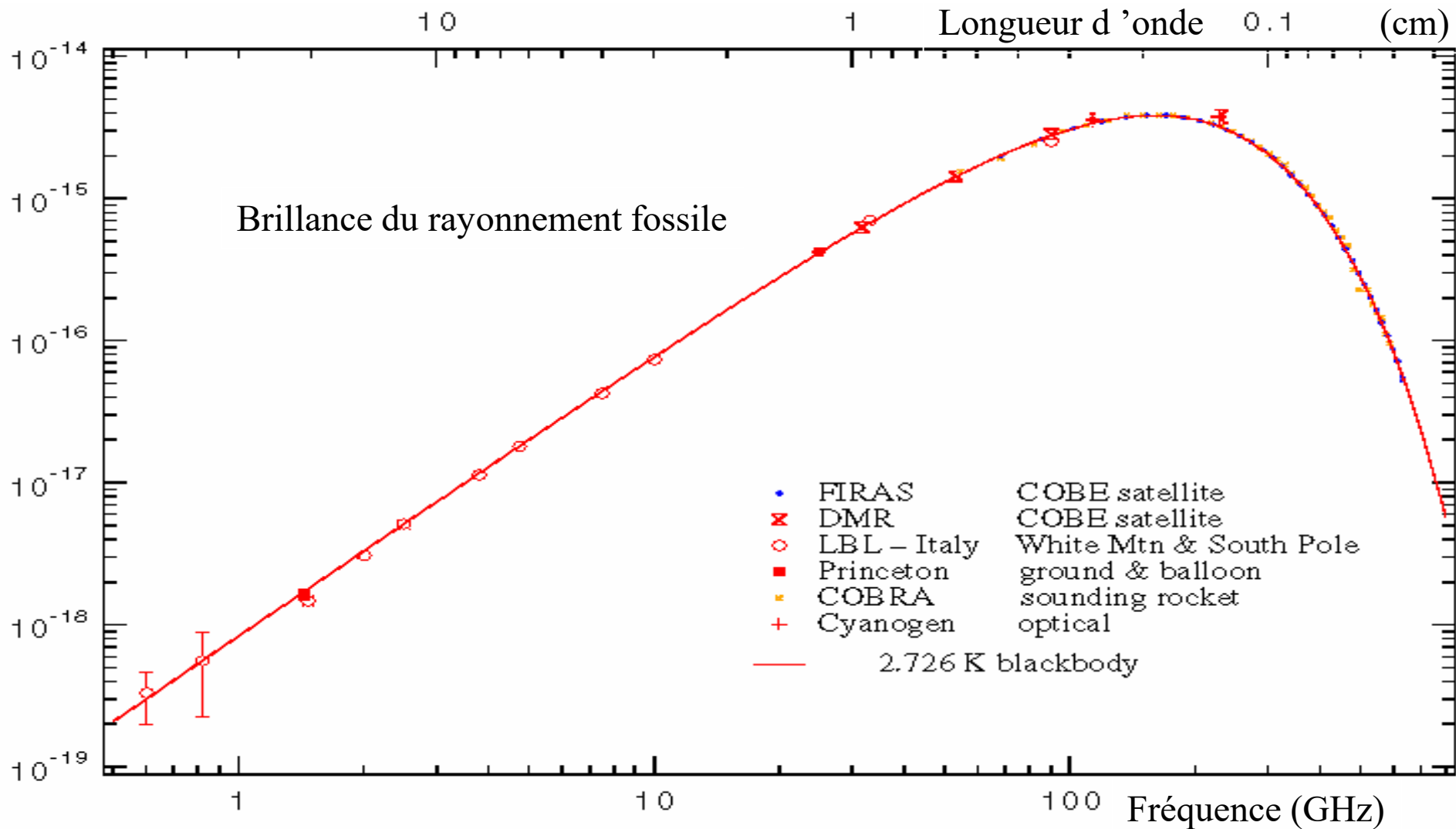
Première détection du rayonnement cosmologique

- Première détection du CMB en 1965 par Penzias & Wilson
« Excès de bruit »



Spectre du rayonnement fossile

Corps noir à $T = 2.72$ K



***Nous baignons dans une lumière diffuse émise il y a une douzaine de milliards d'années,
alors que l'Univers était trois milliards de fois plus petit qu'aujourd'hui.
C'est l'une des preuves les plus solides de la justesse de la théorie du big bang...***

*Christian Magnan
Collège de France, Paris
Université de Montpellier II*

Notre oeil ne perçoit que les rayonnement « visibles », c'est-à-dire ceux dont la longueur d'onde se situe en gros entre 0,4 et 0,8 micron. De ce fait nous avons tendance à penser que nous pourrions connaître l'Univers en nous en tenant à ce seul domaine spectral. Mais les techniques de ce siècle nous ont permis d'accéder de façon courante à d'autres classes de longueur d'onde, soit plus courtes (au-delà du violet, dans l'ultraviolet et plus loin), soit plus longues (en deçà du rouge, dans l'infrarouge et plus loin), et cette ouverture sur d'autres fenêtres nous a fait réaliser des découvertes marquantes. Ainsi nous détectons actuellement dans l'infrarouge une lumière diffuse émise peu après la naissance de l'Univers mais avant la formation des étoiles et des galaxies, à une époque où le monde devait consister en une masse gazeuse plus ou moins indifférenciée. Expliquons ce qu'il en est.

Selon la théorie du big bang, elle-même issue des équations de la théorie de la gravitation d'Einstein, l'Univers était à l'origine dans un état de température et de densité si élevées que le rayonnement était hautement prépondérant sur la matière. Celle-ci n'a pu se former que par la suite, lorsque la température fut devenue suffisamment basse (si l'on peut dire !), de l'ordre du milliard de degrés. Puis a débuté une phase au cours de laquelle les échanges ont contribué à maintenir un équilibre entre l'une et l'autre forme d'énergie.

Enfin, au bout de quelques centaines de milliers d'années, se produisit un événement qui explique la présence actuelle d'un rayonnement diffus : le milieu universel ne cessant sous l'effet de l'expansion de se diluer dans un volume de plus en plus vaste se trouva s'éclaircir assez brutalement en libérant d'un seul coup la lumière que la matière retenait prisonnière. Alors qu'auparavant la densité de matière était si forte que les photons, sans cesse absorbés dès qu'ils étaient émis, n'avaient pas pu nous parvenir, au contraire, une fois établie la transparence du monde à l'échelle universelle, la lumière se propagea librement sans rencontrer d'obstacle.

Lors du découplage entre matière et rayonnement qui donna lieu à cet éclaircissement de l'Univers, la température commune de ces deux constituants était d'environ **4500 degrés**. C'est dans ces conditions que fut émis le rayonnement que nous pouvons qualifier de « primordial » et qui, depuis quelque douze milliards d'années, poursuit sa route à travers le monde. Nous recevons aujourd'hui ceux de ses photons que la Terre intercepte. Seulement le rayonnement a changé d'aspect.

Rappelons-nous: la longueur d'onde d'un rayonnement suit fidèlement l'étirement de l'espace (comme l'intervalle entre les deux fournis suivait l'allongement de l'élastique). Par conséquent, les différentes radiations constituant la lumière fossile ont vu leur longueur d'onde augmenter en accompagnant l'espace dans son expansion. Plus précisément l'Univers aurait grossi dans ses dimensions linéaires d'un facteur 1500 environ (auquel correspond un facteur $1500 \times 1500 \times 1500$, soit plus de 3 milliards en volume) entre l'époque où le rayonnement a été émis et celle où nous le recevons. Les longueurs d'onde sont donc toutes 1500 fois plus grandes qu'à l'origine : au départ exprimées en fractions de microns elles appartiennent aujourd'hui au domaine millimétrique.

Corrélativement - car qui dit longueur d'onde plus grande dit énergie plus petite et donc aussi température plus petite, dans la même proportion - le rayonnement observé correspond de nos jours à une température de trois degrés (2,7 si on tient à être précis), ce nombre trois provenant, d'après le raisonnement, de la réduction par le facteur 1500 (représentant l'effet de l'expansion) des 4500 degrés de départ. Vieux de douze milliards d'années puisque s'étant propagé pendant ce laps de temps mais aussi étonnamment jeune puisque témoin de phases fort précoces de l'histoire du monde, ce rayonnement fossile diffus constitue l'une des preuves éclatantes de la justesse de l'idée connue sous le nom de « big bang » selon laquelle notre monde est né dans un état de compression extrême pour entamer une prodigieuse expansion. Bien que le soubassement théorique de cette vision du monde soit fourni par la théorie de la relativité d'Einstein, l'invention du big bang est à porter au crédit de Alexandre Friedmann (1888-1925) et Georges Lemaître (1894-1966).

Pour avoir découvert ce rayonnement fossile en 1963, de façon fortuite d'ailleurs, **Penzias** et **Wilson** reçurent le prix Nobel. Ils projetaient d'utiliser pour des observations de radioastronomie une antenne chargée à l'origine de capter les signaux des satellites Echo et Telstar. L'instrument avait été conçu selon des caractéristiques spéciales qui le rendaient particulièrement apte à observer de très faibles émissions radio à des longueurs d'onde relativement peu courantes, de l'ordre de quelques centimètres, alors que les grands radio-télescopes classiques étaient prévus pour observer des longueurs d'onde plus grandes. Procédant au réglage et au calibrage de leur instrument ils s'aperçurent de la présence d'un bruit de fond radio parasite dont ils ne parvenaient pas à se débarrasser. Bien leur a pris de s'acharner sur la difficulté et de faire confiance à leur savoir-faire technique. Bien leur a pris aussi de faire part de leur problème à d'autres chercheurs qui, eux, pour les raisons théoriques exposées ci-dessus, pouvaient s'attendre plus ou moins à l'existence d'une telle émission dans cette région de longueur d'onde. S'il pouvait subsister quelques doutes dans l'identification du rayonnement à l'époque même où il fut découvert, ceux-ci sont dorénavant complètement levés. Étant donné l'importance de l'étude du fond diffus cosmologique, un satellite, COBE, lui a été entièrement consacré.

Le rayonnement cosmique fossile possède deux caractéristiques tout à fait exceptionnelles, que voici.

La première est l'extrême degré de précision avec laquelle la répartition de son intensité lumineuse en fonction de la couleur suit la loi théorique connue sous le nom de loi du « corps noir ». C'est même le seul rayonnement de corps noir qu'on trouve dans la nature. Cette loi de corps noir, appelée aussi loi de Planck est valable lorsque le rayonnement est emprisonné par la matière (d'où le nom de corps noir) et que de ce fait il se trouve en équilibre avec elle. Le caractère de corps noir du rayonnement cosmologique montre que les conditions nécessaires à la réalisation de cet équilibre (appelé équilibre thermodynamique) régnaient dans la mixture cosmique d'où provient ce rayonnement, à la manière décrite plus haut. Dans un état d'équilibre thermodynamique, le rayonnement est entièrement défini par *un seul* paramètre, à savoir sa température (qui se trouve alors justement la même que celle de la matière), ici de **2,7 degrés**.

Le deuxième trait exceptionnel du rayonnement cosmologique est son haut **degré d'isotropie**. Cela est incompréhensible dans le cadre de nos théories actuelles. En effet dans les modèles homogènes satisfaisant aux équations d'Einstein (modèles de Friedmann-Robertson-Walker) il se trouve que l'expansion est tellement rapide à l'origine que les différents points composant l'Univers n'ont pas eu le temps d'établir un lien causal entre eux, la lumière ne parvenant pas à rattraper l'expansion. Autrement dit, les différents points se comportent de façon indépendante et dans ces conditions on ne comprend pas comment a pu se réaliser l'isotropie constatée. Je pense personnellement qu'en tentant d'analyser l'origine de l'Univers nous touchons aux limites de validité de nos théories actuelles, lesquelles sont, sans surprise, insuffisantes sur certains points - comme est insuffisante n'importe quelle théorie au-delà de son domaine possible d'application. Pour avancer, il faut d'autres théories, que nous ne possédons pas.

Le rayonnement fossile occupe de ce point de vue une situation centrale en cosmologie : il est à la fois la confirmation éclatante et l'infirmité définitive de notre théorie. Nul doute que notre monde soit né de façon *singulière* et qu'il est en expansion, comme le prévoit le modèle du big bang, mais la description de la *singularité* originelle est impossible (à mon sens) sans un renouvellement théorique complet de nos idées.