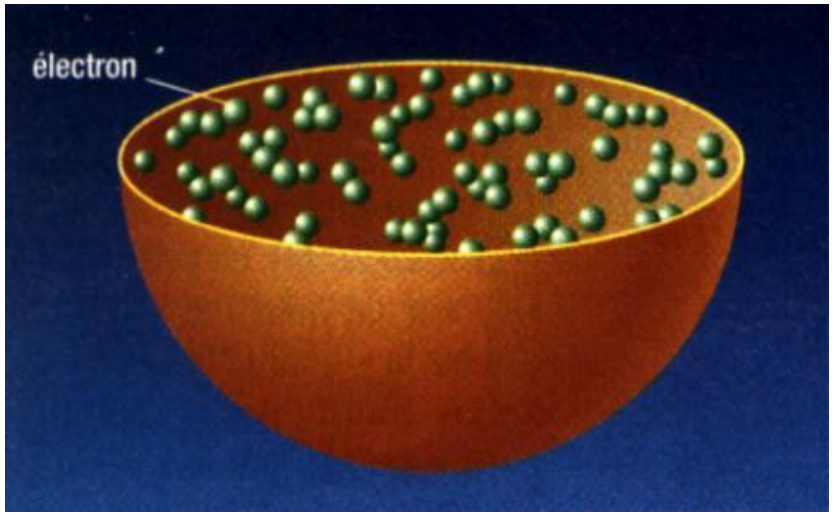
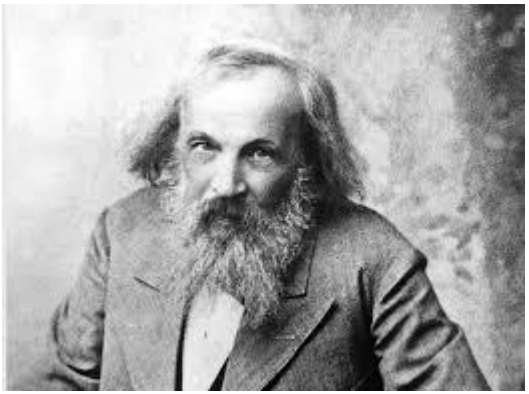
L’atome et ses modèles



2019: Le tableau de Mendeleïev a 150 ans !



✓ Les humains ont toujours voulu connaître la structure et les composantes fondamentales de la matière.

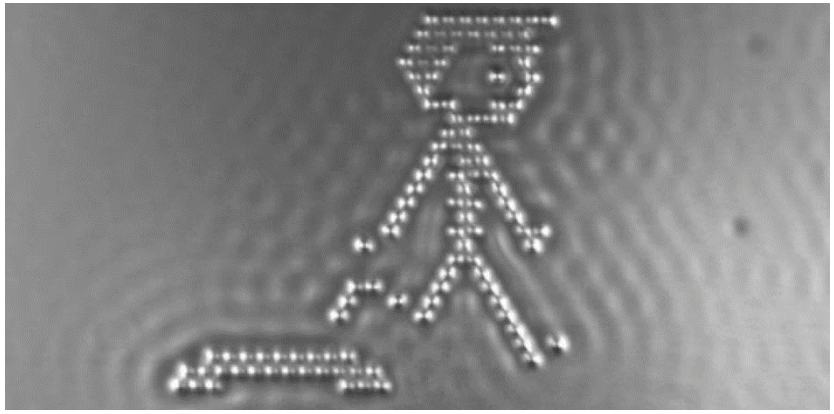
Pb: Il est impossible de toucher ou de voir un atome (au XIXe)

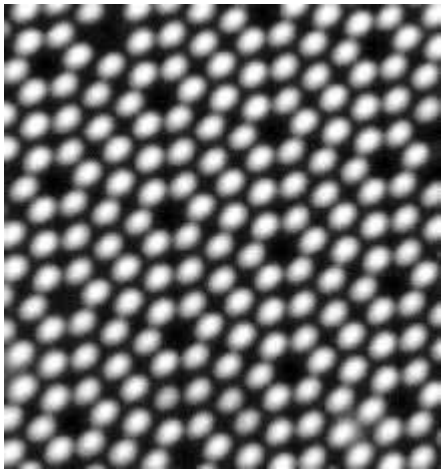
→ Il faut considérer des *modèles*, des *représentations* de ce que nous avons nommé atome.

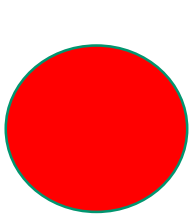
Modèle:

représentation visible d'une « réalité » invisible

✓ Aujourd'hui on peut voir les atomes individuellement en utilisant par exemple un microscope électronique







0.0000000001 m
1 Angström

✓ En 1900…

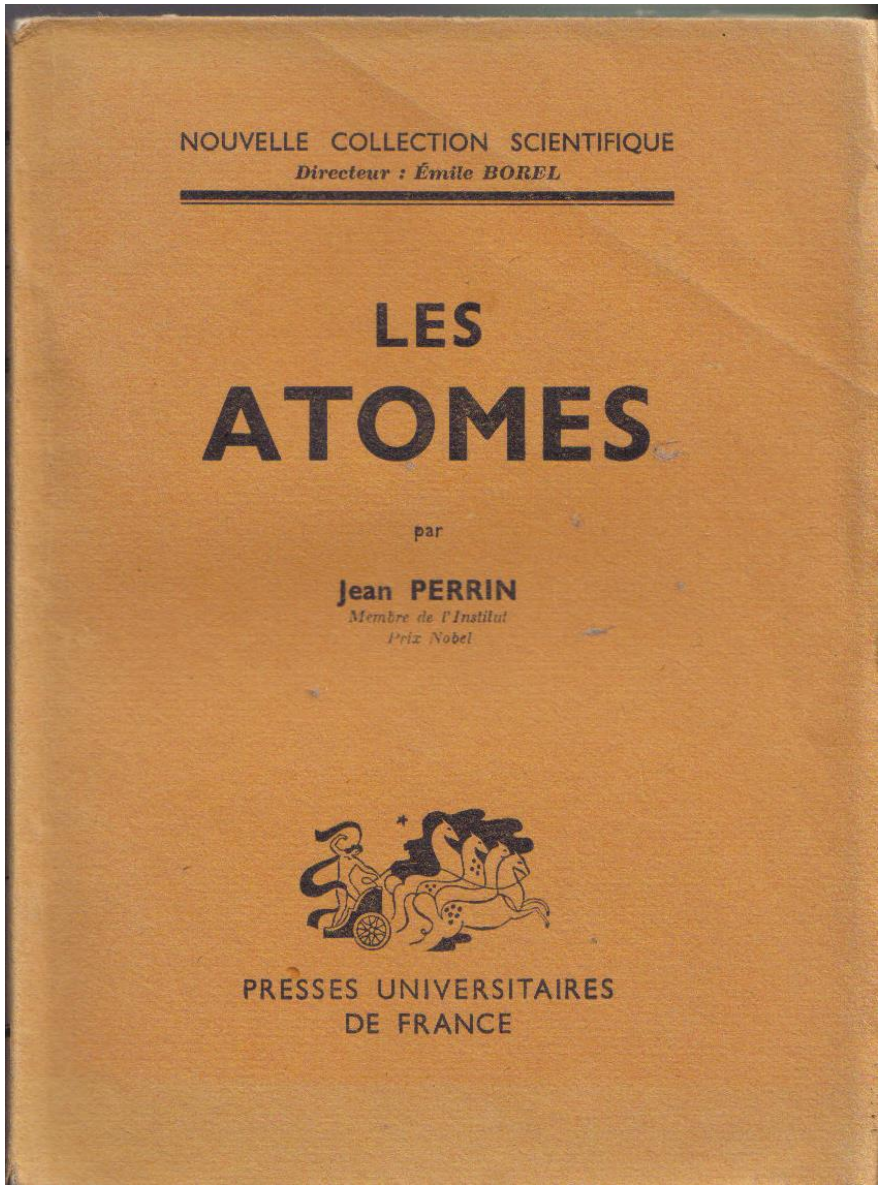
0.000001 m
1 μm

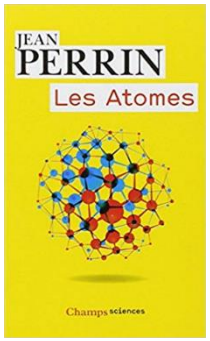
Aède

Un **aède** est, en Grèce antique, un artiste qui chante des épopées en s'accompagnant d'un instrument de musique.

« Molécules: Il y a vingt siècles peut-être, sur les bords de la mer divine, où le chant des **aèdes** venait à peine de s'éteindre, quelques philosophes enseignaient déjà que la matière changeante est faite de grains indestructibles en mouvement incessant, atomes que le hasard ou le destin auraient groupés au cours des âges selon des formes ou les corps qui nous sont familiers. Mais nous ne savons presque rien de ces premières théories.»

Jean Perrin, *Les Atomes*, Paris 1913


NOUVELLE COLLECTION SCIENTIFIQUE
Directeur : Émile BOREL
LES
ATOMES
par
Jean PERRIN
Membre de l'Institut
Prix Nobel
PRESSES UNIVERSITAIRES
DE FRANCE


JEAN
PERRIN
Les Atomes
Champs sciences

Pour la première fois, un système du monde fut élaboré **sans présupposer qu'un esprit eut l'intention de le fabriquer ou de le créer**. La théorie atomiste préfigure la pensée moderne, non parce qu'elle utilise le terme « atome », mais parce **qu'elle s'efforce de construire la complexité du réel à partir de principes réels**. Cause et effet doivent être définis sur le même plan. Par cette détermination d'une causalité homogène, **Démocrite** et **Leucippe** ont jeté les fondements de la recherche objective et de l'esprit scientifique.

Les Grecs

Leucippe (460-370 av. J. C.)
Démocrite (460-370 av. J. C.)
Aristote (384-322 av. J. C.)

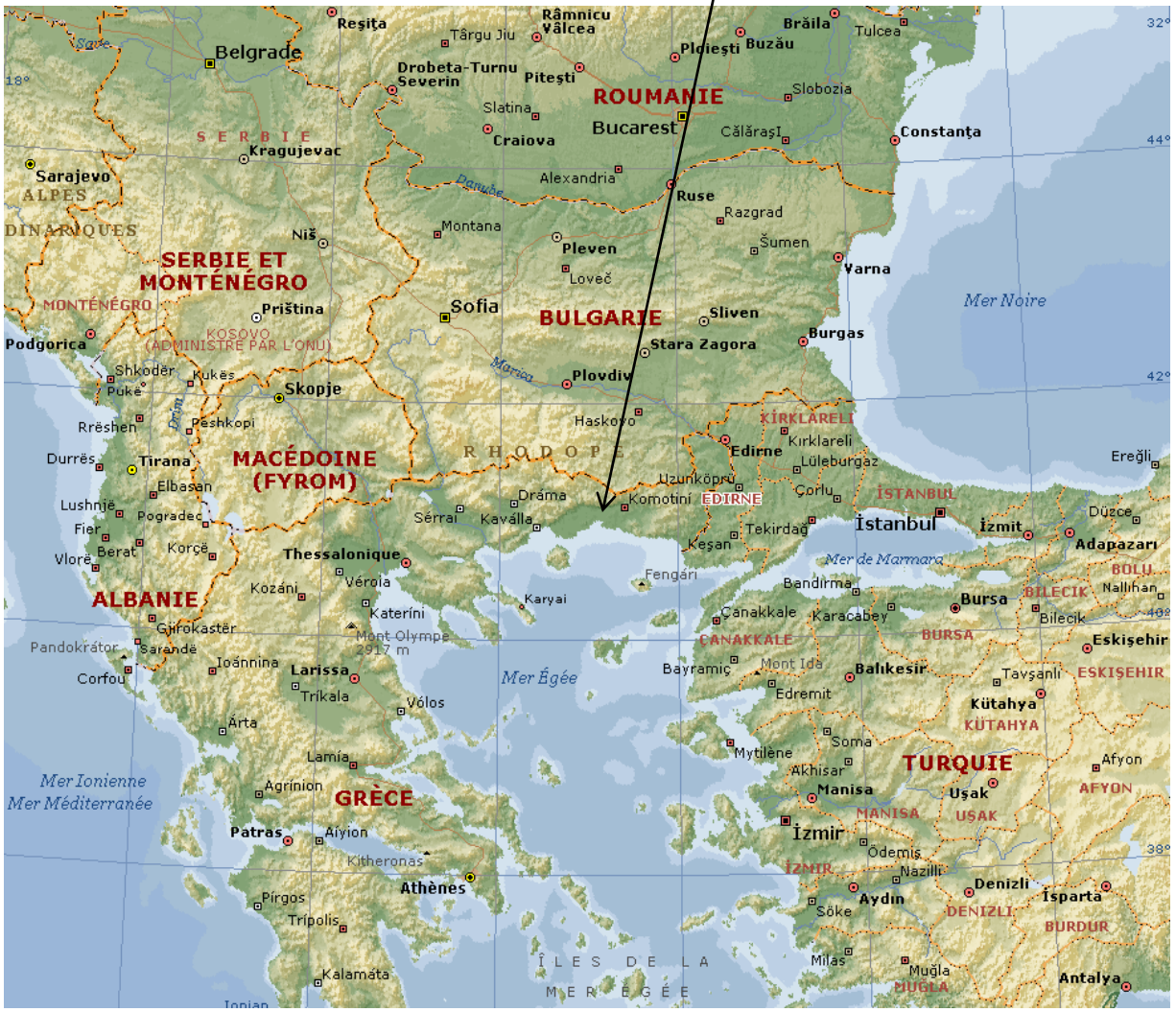
A partir d'intuitions, ils recherchaient à expliquer l'univers sans l'intervention des Dieux

« Rien ne se produit vainement, mais tout se produit à partir d'une raison et en vertu d'une nécessité. » Leucippe.

✓ Atome vient du grec atomos, c'est-à-dire «indivisible».

✓ On pense que c'est **Leucippe** qui conçut l'étrange idée des atomes.

Démocrite (460-370 av. J.-C.) d'Abdère



Le philosophe grec Démocrite développe la théorie atomiste de l'Univers dont Leucippe émettra une première formulation. Concevant la création des mondes comme la conséquence naturelle de l'incessant tournoiement des atomes dans l'espace, il admet deux principes de formation de l'Univers. Le plein, qu'il nomme atomos (« indivisible »), et le vide dans lequel se déplacent les particules de matière pure, minuscules, invisibles, indestructibles et infinies en nombre.

Ces atomes n'étaient pas tous identiques pour pouvoir expliquer la diversité de la nature et n'avaient pas tous non plus la même forme, certains étaient ronds et lisses et d'autres rugueux et crochus. Si un objet se transforme, les atomes qui le constituent se dispersent, puis se recombinent pour former un autre objet. Il en est de même pour l'âme qui est formée d'atomes ronds et lisses, elle n'est donc pas immortelle et comme elle est étroitement liée au cerveau lorsque celui-ci se décompose nous perdons conscience. Ainsi Démocrite clôturait la philosophique grecque de la nature et commençait l'ère du "**matérialisme**".

Digression: la pesée de l'âme….

L'hypothèse de la masse de l'âme (dite à tort du poids de l'âme), ou **théorie des 21 grammes**, est émise par le médecin américain Duncan MacDougall en mars 1907. Selon cette hypothèse le corps humain aurait une âme et cette âme aurait une masse estimée à 21 grammes (environ trois quarts d'once). Au moment de la mort, l'âme s'échapperait du corps humain, qui se retrouverait allégé de ce poids. MacDougall avance ce chiffre après avoir effectué une série de pesées sur six humains moribonds puis décédés, dont un seul montre une différence de poids de près de 21 grammes, puis sur une quinzaine de chiens, sans mettre en évidence de différence dans leur cas. Ces résultats n'ont jamais pu être confirmés et les méthodes de MacDougall ont été largement critiquées, mais l'expérience reste populaire pour appuyer la croyance en l'existence d'une âme dans le milieu des pseudo-sciences.

SOUL HAS WEIGHT, PHYSICIAN THINKS

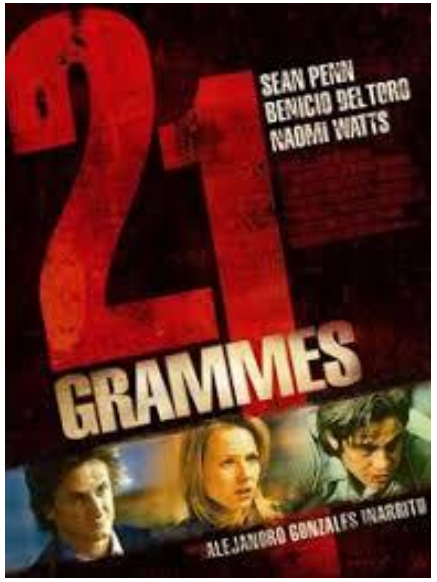
Dr. Macdougall of Haverhill Tells of Experiments at Death.

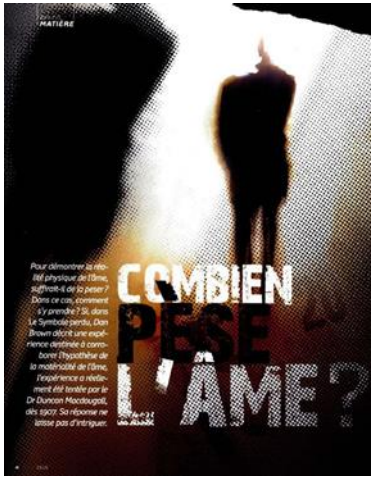
LOSS TO BODY RECORDED

Scales Showed an Ounce Gone in One Case, He Says—Four Other Doctors Present.

Special to The New York Times.

BOSTON, March 10.—That the human soul has a definite weight, which can be determined when it passes from the body, is the belief of Dr. Duncan Macdougall, a reputable physician of Haverhill. He is at the head of a Research Society which for six years has been experimenting in this field. With him, he says, have been associated four other physicians.





S&V: Nov. 2018

SOUL HAS WEIGHT, PHYSICIAN THINKS

Dr. Macdougall of Haverhill Tells of Experiments at Death.

LOSS TO BODY RECORDED

Scales Showed an Ounce Gone in One Case, He Says—Four Other Doctors Present.

Special to The New York Times.

BOSTON, March 10.—That the human soul has a definite weight, which can be determined when it passes from the body, is the belief of Dr. Duncan Macdougall, a reputable physician of Haverhill. He is at the head of a Research Society which for six years has been experimenting in this field. With him, he says, have been associated four other physicians.

Youtube: https://www.youtube.com/watch?v=Z2j0XrbplmU

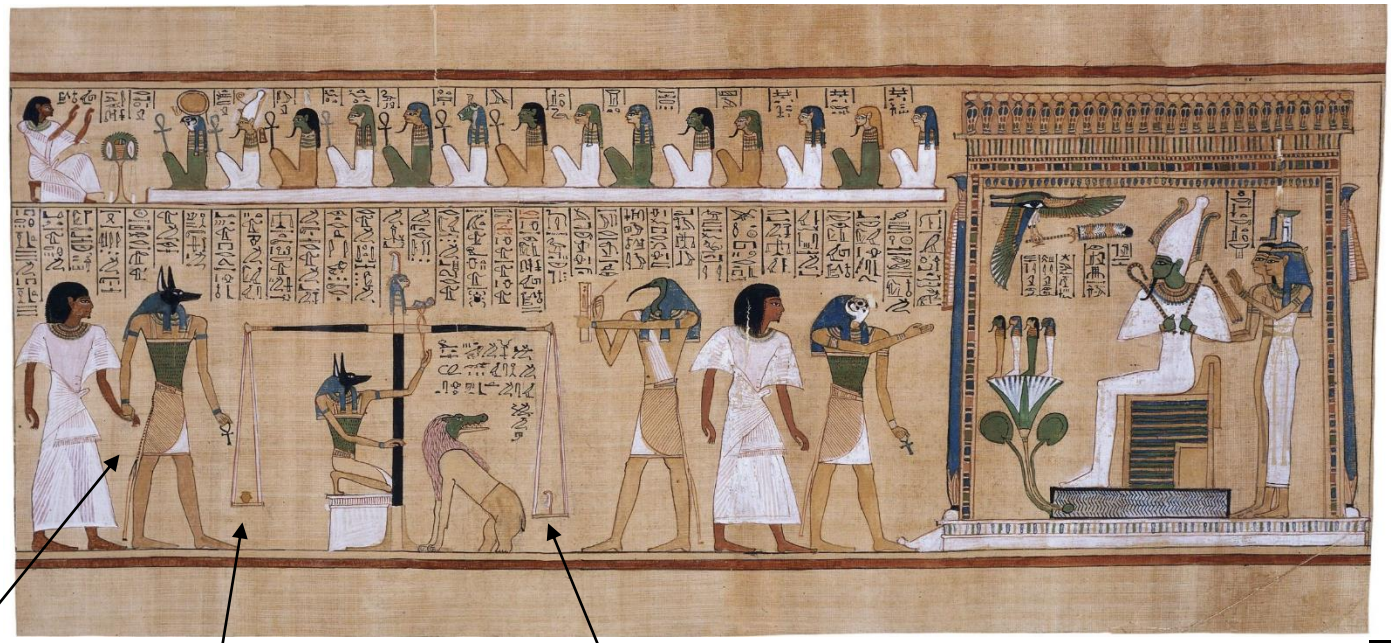
Le confort du patient était assuré de toutes les manières possibles, quand bien même il était pratiquement moribond lorsqu'il fut placé sur le lit. Il perdait du poids lentement, au rythme d'une once par heure (38.3495 grammes, donc), en raison de l'évaporation d'humidité par la respiration et l'évaporation de sueur.

Cela a duré trois heures et quarante minutes durant lesquelles je n'ai pas quitté des yeux le balancier. Il expira soudain. Le balancier toucha subitement le bas sans remonter, dans un grand bruit. La perte était de ¾ d'once précisément (un peu plus de 21 grammes).

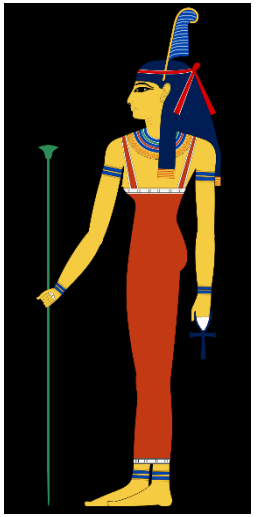
Cette perte de poids ne pouvait pas être due à une évaporation d'humidité pulmonaire ou de transpiration, puisqu'on avait établi que celles-ci se produisaient au rythme d'un soixantième d'once par minute. Tandis que cette perte-ci était soudaine et large; trois quarts d'once en quelques secondes seulement. Les intestins ne se sont pas vidés et même si cela avait été le cas, leur contenu se serait déversé sur le lit et auraient été pesés quand même (…)

Ne restait plus qu'à explorer un dernier canal pour expliquer cette subite perte de poids: l'expiration de l'air résiduel contenu dans les poumons. Je grimpai donc sur le lit et mon collègue remit la balance à zéro. Forcer l'inspiration et l'expiration n'eut aucun effet sur la balance. Dans ce cas, nous avons une perte de poids de ¾ d'once inexplicable. S'agit-il de la substance de l'âme? Comme l'expliquerions-nous autrement ?

Digression: la pesée de l'âme….



Seth cœur plume de Maât

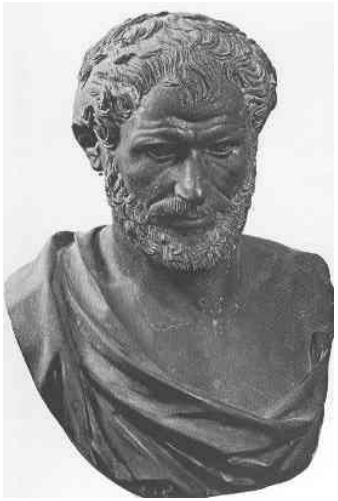


Maât: Déesse de l'ordre, de l'équilibre du monde, de l'équité, de la paix, de la vérité et de la justice

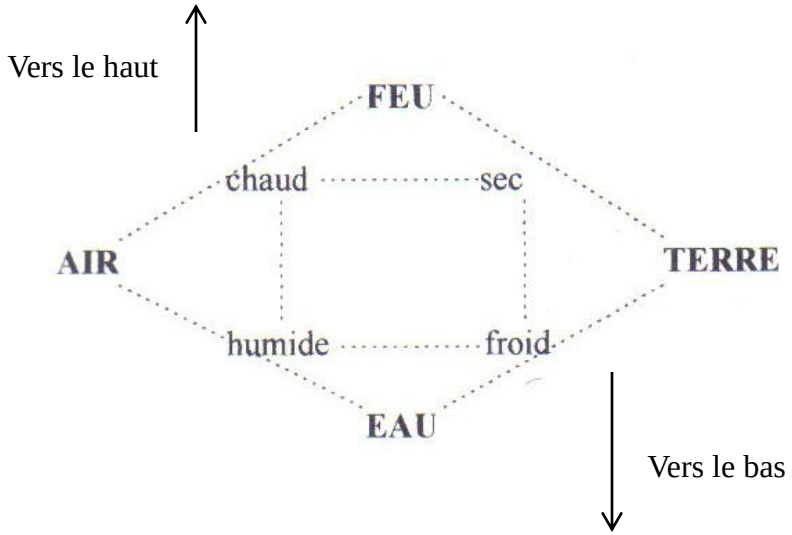
- Développement des balances au moyen-âge…

Aristote (384-322 av J.C.)

Une matière fondamentale amorphe unique devient matière sensible et prend **forme** en acquérant des **qualités**, au nombre de quatre, associées par couple:



Les quatre éléments



✓ la matière fondamentale est immuable et divisible à l'infini.

✓ les éléments se transforment les uns dans les autres en changeant de qualité et de forme.

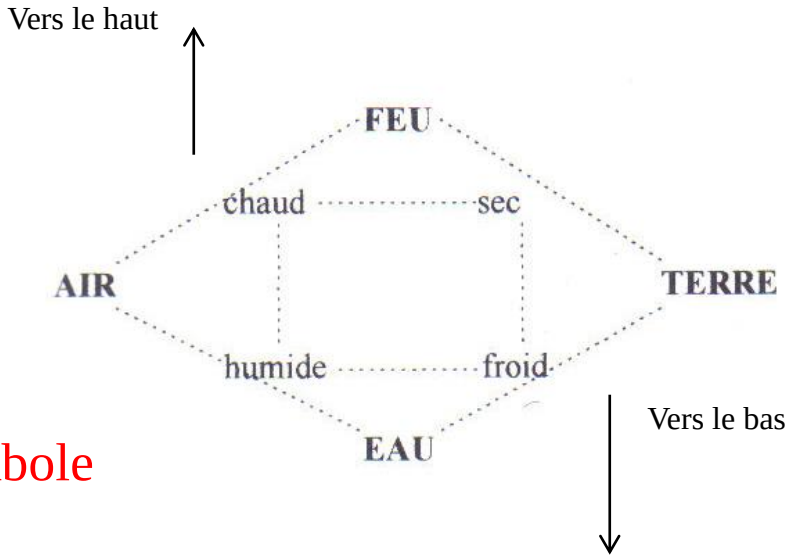
✓ *l'univers est plein et qu'il n'y a pas de vide.*

✓ il existe un moteur primordial parfait qui anime le monde et modifie la forme des choses.

Chaque substance présente dans l'univers serait constituée d'un ou plusieurs de ces éléments, en plus ou moins grande quantité. Ceci expliquerait le caractère plus ou moins volatil, chaud, froid, humide, ou sec (= les quatre qualités) de chaque matière.

T E A F

symbole

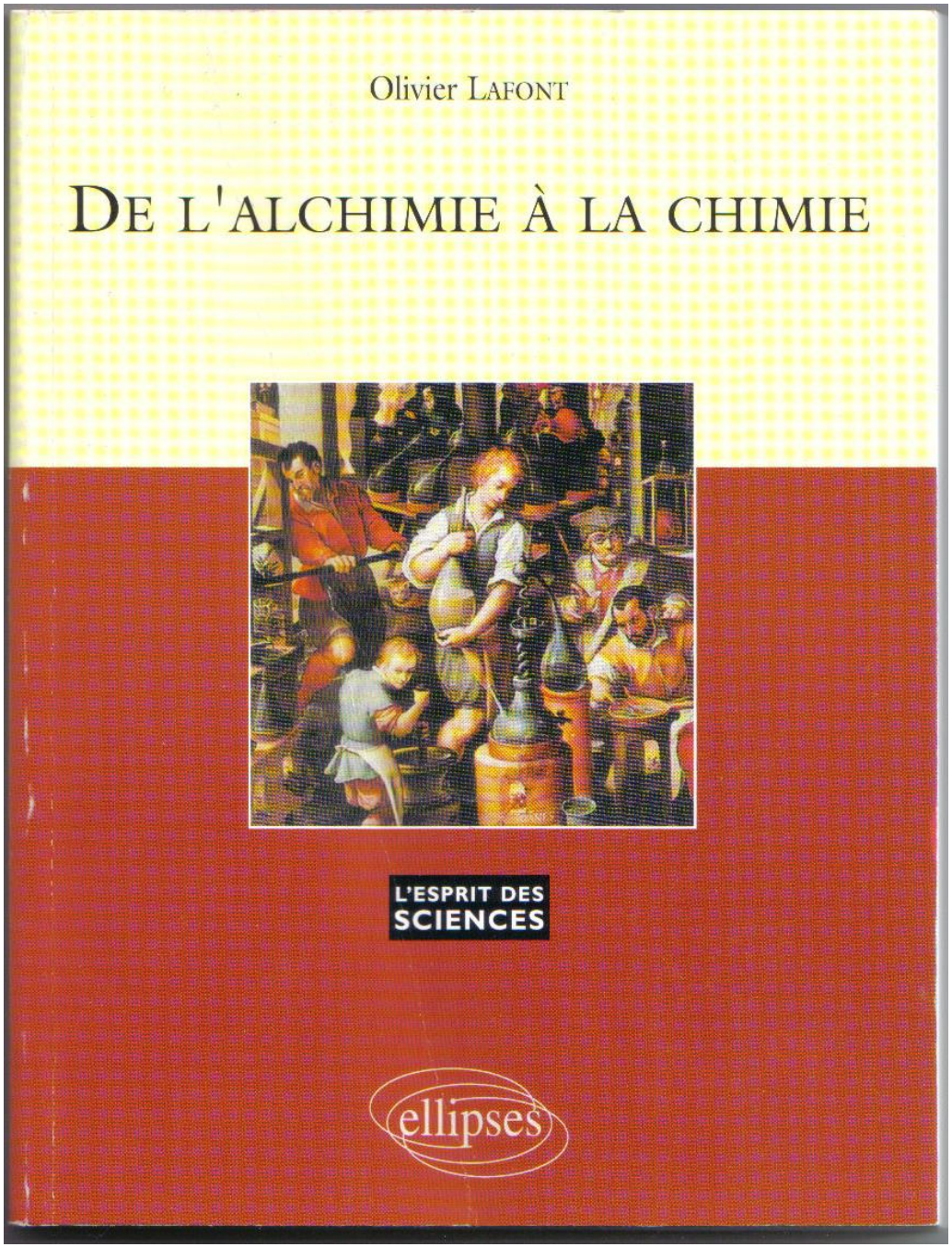


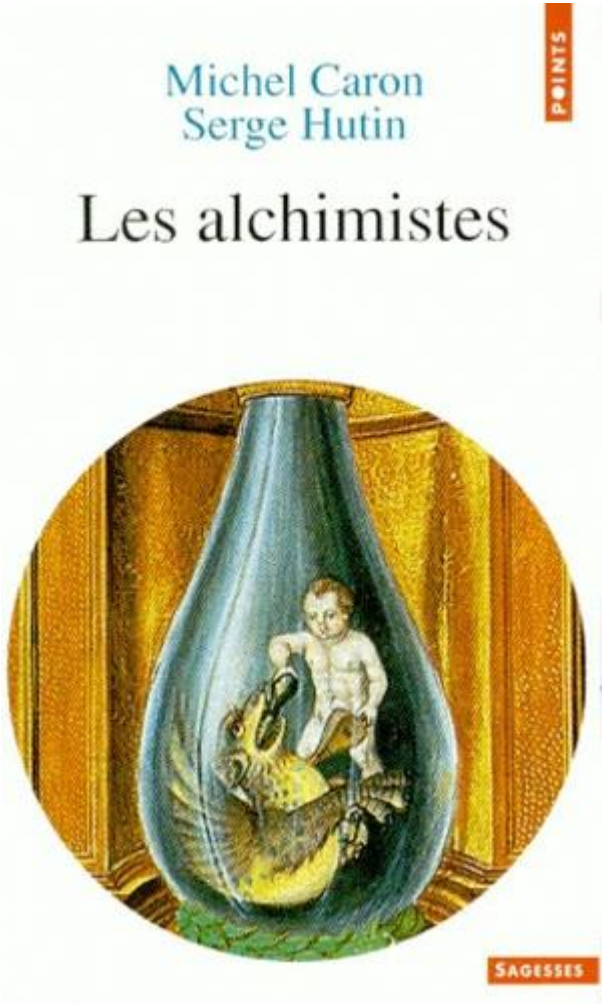
Gravure de l'ouvrage Daniel Stolz von Stolzenberg, Viridarium chymicum (1624)

C'est à l'époque des croisades, au XII^{e} siècle en Terre Sainte, et de la reconquista en Espagne (722-1492), que le savoir des Grecs -et la théorie aristotélicienne des éléments- a pénétré en Occident par l'intermédiaire des Arabes. Or, ces derniers ont essentiellement conservé dans leurs écrits l'enseignement d'Aristote. Celui de Démocrite ne s'est donc pas transmis.

La théorie d'Aristote ayant été plus populaire que celle de Démocrite…

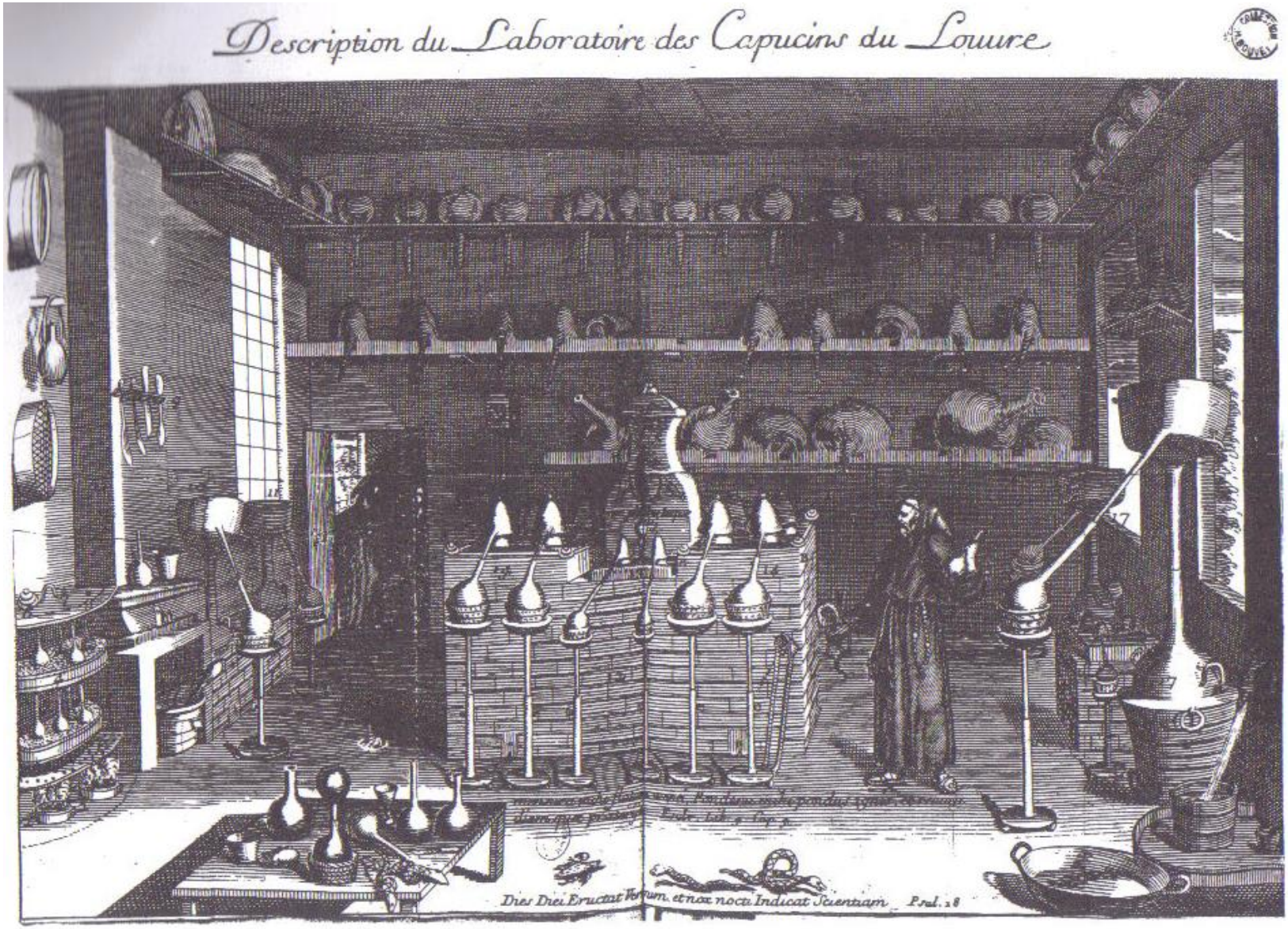
→ Les modèles de l'atome ont du patienter presque **deux millénaires**





Lucien Braun, Paracelse, collection « Fleuron », Éditions Slatkine, 1994.

Au temps des alchimistes…



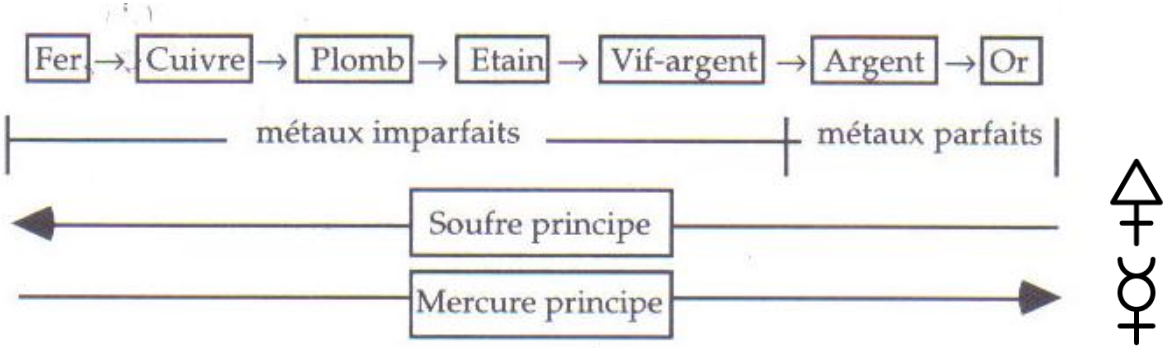
Caractère mystique du chiffre 7

Correspondance entre métaux et planètes
(Lune et Soleil sont considérés comme des planètes !)

Métal	*Représentation alchimique*	*Planète*
Fer	♂ ♆	Mars
Cuivre	♀	Vénus
Plomb	♄	Saturne
Étain	☿ ♃	Jupiter
Vif-argent	☽ ☿ ☿	Mercure
Argent	☾	Lune
Or	☉	Soleil

Au centre de la terre a eu lieu le mariage philosophique du Mercure et du Soufre…

Hiérarchie et composition des métaux



« Les alchimistes distinguent deux principes opposés, le Soufre et le Mercure, auxquels ils associent un moyen : le Sel. […] Il faut dès maintenant remarquer que ces noms de Soufre, Mercure, Sel (ou Arsenic) ne désignent pas les corps chimiques du même nom, mais représentent certaines qualités de la matière : le Soufre désigne les propriétés actives (par exemple : combustibilité, pouvoir d'attaquer les métaux), le Mercure les propriétés dites « passives » (par exemple : éclat, volatilité, fusibilité malléabilité) ; quant au Sel, c'est le moyen d'union entre le Soufre et le Mercure, comparé souvent à l'esprit vital qui unit l'âme au corps. Le Mercure, c'est la matière, le principe passif, féminin ; le Soufre, la forme, le principe actif, masculin ; quant au Sel, c'est le mouvement, moyen terme grâce auquel le Soufre donna à la matière toutes espèces de formes (ainsi se trouve observée la « loi du triangle » celle du ternaire : les deux principes en postulent un troisième).

Le Soufre et le Mercure symbolisent les deux propriétés contraires de la matière : « Je dis : il y a deux natures, l'une active, l'autre passive. Mon maître me demanda : quelles sont ces deux natures ? Et je répondis : l'une est de la nature du chaud, l'autre du froid. Quelle est la nature du chaud ? le chaud est actif et le froid passif. » (Artephius, Clavis Majoris sapientiae) Le Soufre, c'est le principe fixe, le Mercure le principe volatil. D'où le tableau suivant :

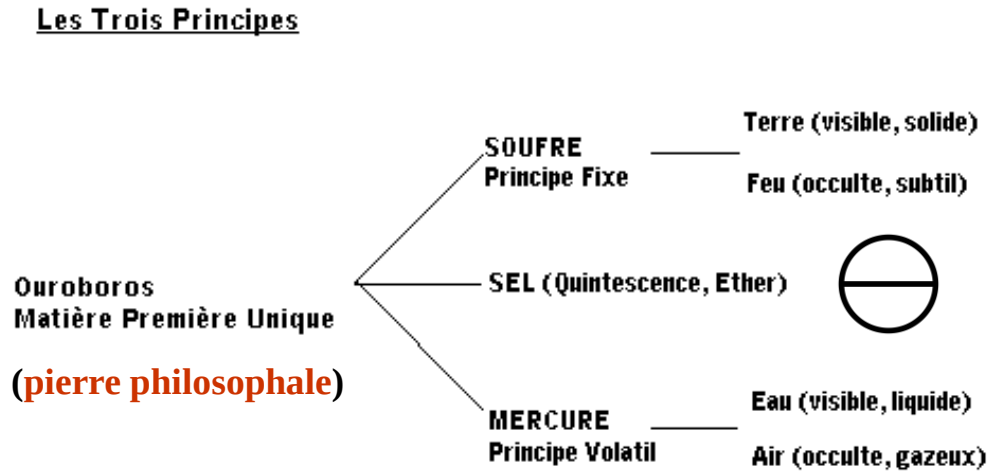
Soufre // Masculin // Actif // Chaud // Fixe
Matière première :
Mercure // Féminin // Passif // Froid // Volatil

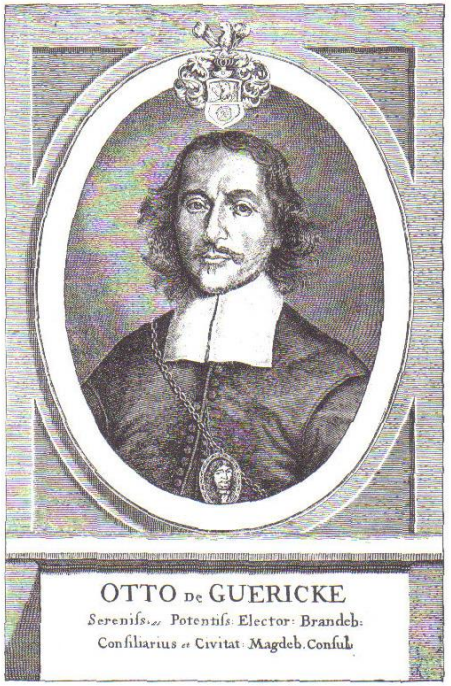
Les alchimistes déduisent de là toute une théorie sur la genèse des métaux, d'où les qualificatifs de père et de mère des métaux donnés au Soufre, principe actif, et au Mercure, principe passif : séparés dans le sein de la terre, les deux principes, attirés sans cesse l'un vers l'autre, se combinent en diverses proportions pour former métaux et minéraux sous l'influence du feu central ; et, selon l'expression d'Albert le Grand dans son Composé des Composés, « La différence seule de cuisson et de digestion produit la variété dans l'espèce métallique ».

Serge Hutin, « L'Alchimie » PUF

Le moyen-âge

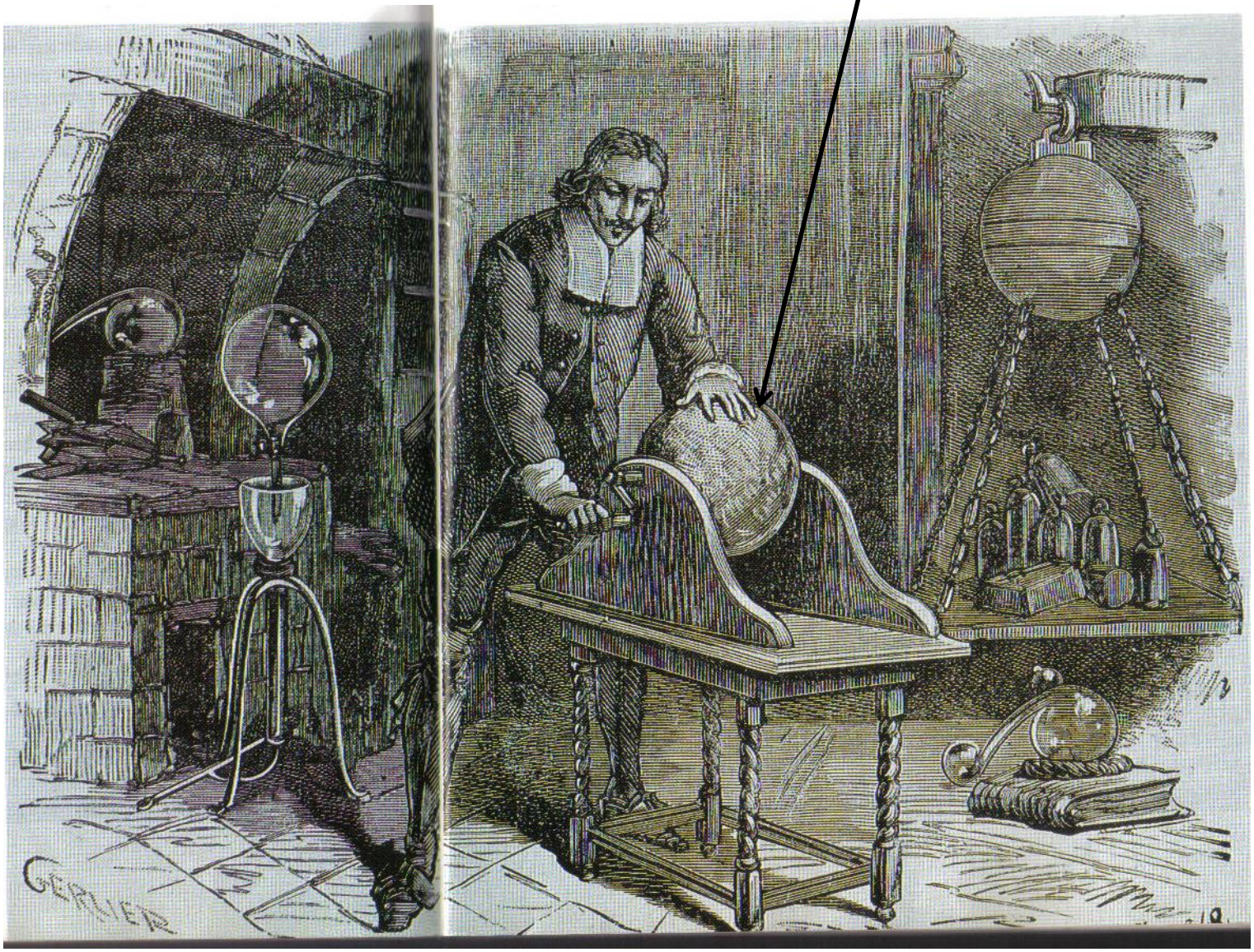
L'alchimie …



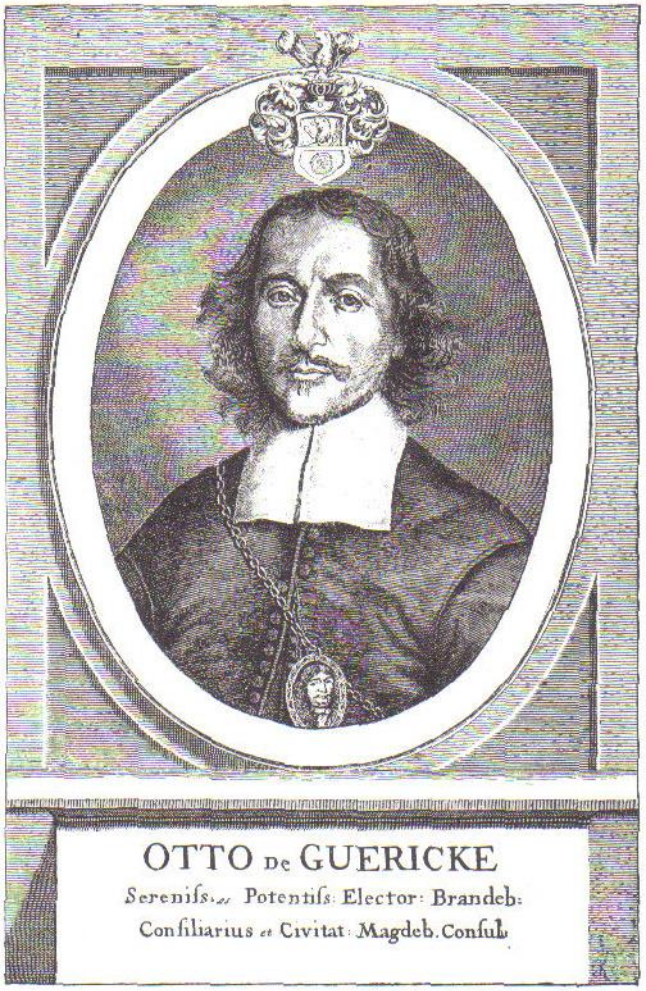


(1654) Existence du vide niée par Aristote …

Soufre (alchimie)

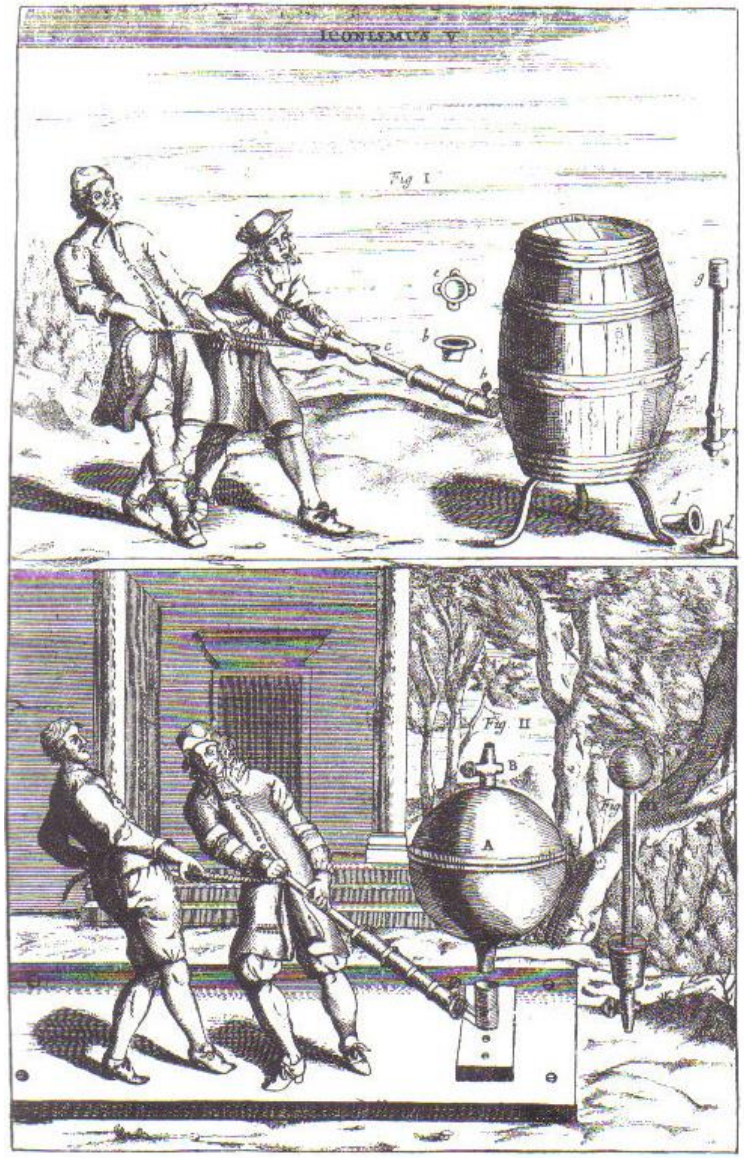


Otto von Guericke (1602-1686)



« les hémisphères de Magdeburg »

Huit chevaux…



ICONISMUS XI
Fig. I.
A
B
Fig. IV.
Fig. V.
Fig. II.
D
Fig. III.

Phlogistique: (du grec phlogistos, ‹ inflammable ›), substance hypothétique représentant l'inflammabilité, créée à la fin du XVII^{e} siècle par les chimistes allemands Johann **Becher** et Georg **Stahl** pour expliquer le phénomène de **combustion**. Selon la théorie du phlogistique, une substance capable de subir la combustion contient un phlogistique et le processus de combustion correspond essentiellement à *la perte du phlogistique*. Comme un composé, tel que le mercure, s'alourdit pendant la combustion, on supposa que le phlogistique avait une masse négative: une substance qui perd le phlogistique s'alourdit.

Combustion: oxydation rapide d'un composé (le combustible) par un oxydant (le comburant) avec formation d'un plasma et dégagement de chaleur.

Antoine Laurent de Lavoisier (1743-1794)

(fondateur de la chimie moderne)

« *En apprenant aux chimistes l'usage de la balance, du baromètre et du calorimètre […] Lavoisier leur a ouvert des routes inconnues qui conduisent sûrement à la vérité* » Louis Pasteur « *Eloge de Lavoisier* », 1836

Antoine Laurent de Lavoisier (1743-1794)

✓ Lavoisier fut l'un des premiers à réaliser des expériences chimiques réellement quantitatives.

✓ Il montra qu'en dépit du changement d'état de la matière au cours d'une réaction chimique, la quantité de matière **restait constante** entre le début et la fin de chaque réaction.

✓ Ces expérimentations ont fourni des preuves en faveur de la

loi de la conservation de la matière

✓ Il étudie la nature de la combustion (ou brûlage).

✓ Il met fin aux croyances de l'alchimie et à la théorie du **Phlogistique**.

✓ Il élabore une **nouvelle nomenclature chimique** qui servit de base au système actuel.

✓ Il clarifie le **concept d'élément chimique**.

Lavoisier fut l'un des premiers à réaliser des expériences chimiques réellement quantitatives. Il montra qu'en dépit du changement d'état de la matière au cours d'une réaction chimique, la quantité de matière restait constante entre le début et la fin de chaque réaction. Ces expérimentations ont fourni des preuves en faveur de la loi de la conservation de la matière. Lavoisier fit également des recherches sur la composition de l'eau, dont il appela les composants oxygène et hydrogène.

L'une des plus importantes expériences de Lavoisier concerna la nature de la combustion (ou brûlage). Il démontra ainsi que le processus de combustion implique la présence d'oxygène. Il démontra également le rôle de l'oxygène dans la respiration chez les animaux et chez les végétaux. Les explications de Lavoisier sur la combustion remplacèrent la doctrine du phlogistique. Celle-ci postulait en effet qu'une substance se dégageait, le phlogiston, lorsque la matière se consumait.

Avec le comte Claude Louis **Berthollet**, chimiste français, et d'autres chimistes, Lavoisier élabora une nouvelle nomenclature chimique qui servit de base au système actuel. Il décrivit ce système dans son ouvrage Méthode de nomenclature chimique, (1787). Dans son Traité élémentaire de chimie (1789), Lavoisier clarifia son concept d'élément chimique, défini comme substance simple n'étant susceptible d'être divisée par aucune méthode connue d'analyse chimique. Il élabora ainsi une théorie sur la formation des composés chimiques à partir d'éléments chimiques. Les autres traités de Lavoisier sont : Sur la combustion en général (1777) et Considérations sur la nature des acides (1778).

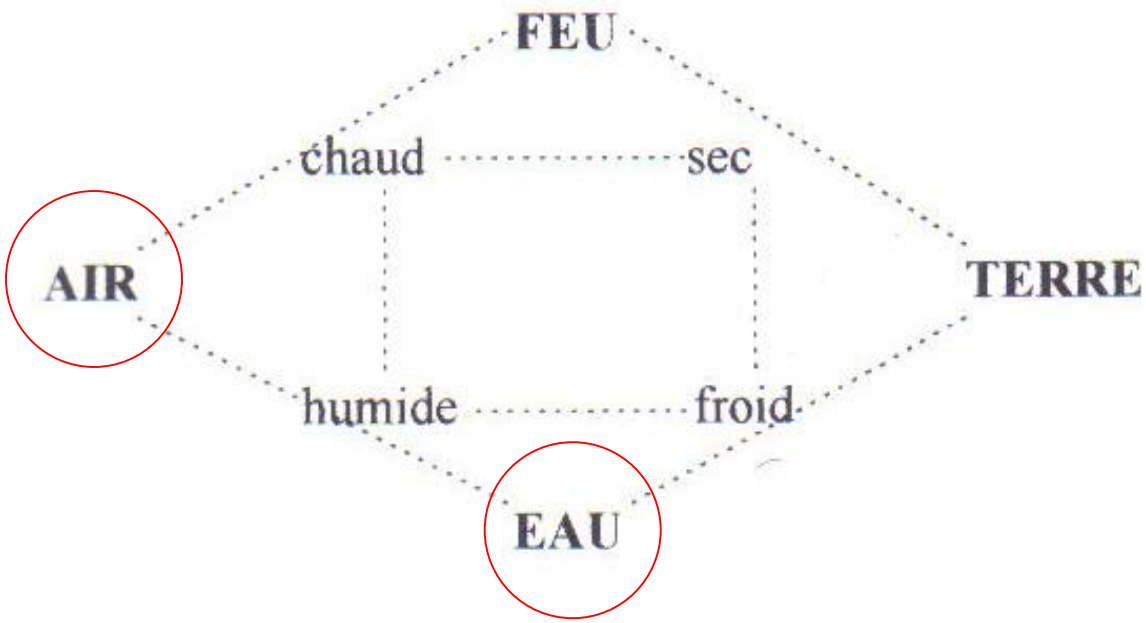
Claude Louis **Berthollet** (1748-1822)

Contrairement aux minutieuses balances des bijoutiers, celles des chimistes n'étaient pas d'une très grande précision. *Mais Lavoisier, lui, voulait des balances qui n'existaient même pas à l'époque*. Il pousse donc deux fabricants parisiens à en concevoir de nouvelles. Les balances sont appréciables et munies d'une lunette fixe qui permet de lire la position de l'aiguille sur un cadran gradué. À vrai dire, ces balances sont les meilleures et les plus précises de l'époque. La balance de Mégnié est sensible à cinq milligrammes pour une portée de 600 grammes. L'autre balance que Lavoisier a fait construire possède une précision de **25 milligrammes jusqu'à dix kilogrammes**.

Muni de telles balances, Lavoisier fournira des données expérimentales très précises.

Lavoisier est, avec Laplace, l'auteur des premières mesures calorimétriques. Pour cela il utilise un calorimètre, instrument pour mesurer les quantités de chaleur, à fusion de la glace.

Rappel: selon Aristote…



<u>Production d'hydrogène</u> par dissolution d'un métal par de l'acide sulfurique

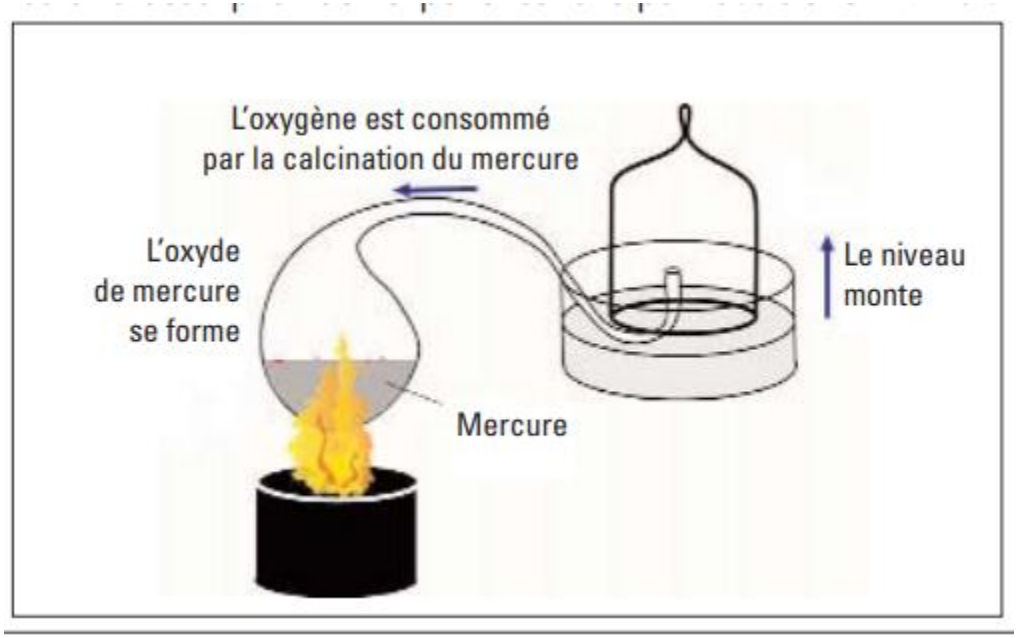
Dissolution de l'acide sulfurique H_2SO_4 (l) → $2H^+$ (aq) $SO4^{2-}$ (aq)

$$Fe(s) + 2H^+(aq) \rightarrow Fe^{2+}(aq) + H_2(g)$$

(1493-1541)

Le processus historique de production d'hydrogène fait réagir des copeaux de fer ou de zinc et de l'acide sulfurique.

C'est le moyen qui est utilisé par **Paracelse** qui savait que, pendant cette réaction, il se dégageait « un air comme un souffle », et que cet air provenait de l'eau dont il était un élément. Toutefois Paracelse ne connaissait aucun moyen pour recueillir les gaz, quoique le moyen en fût très-simple, et d'en étudier les propriétés.



- Lavoisier chauffe fortement pendant plusieurs jours 4 onces (122,3 g) de mercure dans une cornue. Il recueille 2,38 g d'oxyde rouge à la surface du mercure et constate que le volume d'air de la cloche (à droite sur le dessin) a diminué de 0,14 litre. Le gaz restant dans la cloche ne permet plus la combustion d'une bougie.

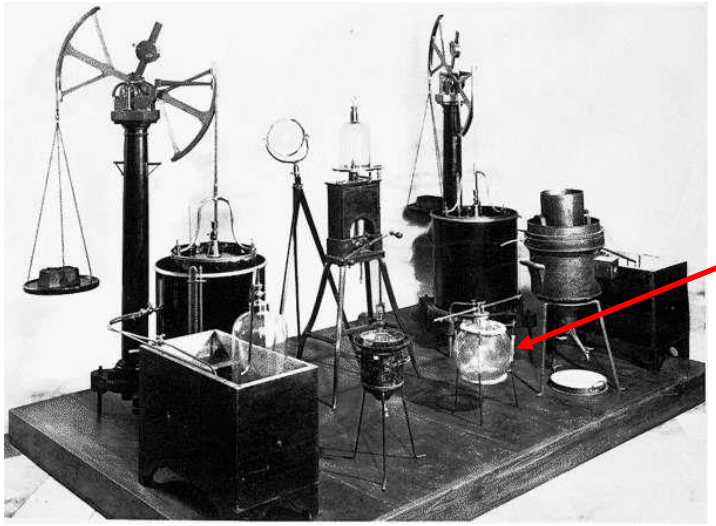
- Il place ensuite l'oxyde de mercure dans une autre cornue et le chauffe : il récupère ainsi 2,19 g de mercure et 0,14 litre d'un gaz qui stimule la flamme d'une bougie. En mélangeant ce nouveau gaz avec celui restant sous la cloche après la première opération, il retrouve le même volume d'air qu'au départ, soit 0,8 litre, et constate que cet air a bien retrouvé ses propriétés initiales (« J'ai rétabli ce dernier [l'air] assez exactement dans l'état où il était avant, c'est-à-dire dans l'état d'air commun : cet air n'éteignait plus les lumières, il ne faisait plus périr les animaux. »)

✓ En avril **1776** il effectue avec **Trudaine** l'expérience cruciale d'analyse de l'air:

- 4/5 de « mofette » (notre azote)
- 1/5 d'« air vital » qu'il nomme « principe oxygène »

L'air n'est donc pas un élément

✓ Le 28 février **1785**, à l'Arsenal, **Meusnier**, **Berthollet** et **Lavoisier** opèrent la synthèse de l'eau dans un ballon.



✓ Il y a trois tubulures qui servent: à faire le vide au préalable, à envoyer de l'hydrogène et de l'oxygène.

✓ L'hydrogène est allumé par une étincelle électrique et l'eau apparaît en gouttelettes condensées sur les parois du ballon

L'eau n'est donc pas un élément

(1785) → C’est la fin de l’alchimie, la mort du phlogistique et le début de la **chimie moderne**

Le 28 février 1785, à l'Arsenal, Meusnier, Berthollet et Lavoisier opèrent la synthèse de l'eau

DÉVELOPPEMENT
DES DERNIÈRES EXPÉRIENCES
SUR
LA DÉCOMPOSITION ET LA RECOMPOSITION
DE L'EAU[1].

La composition de l'eau avait d'abord été soupçonnée, d'après la remarque faite par plusieurs physiciens français et anglais, qu'en brûlant ensemble l'air vital et le gaz hydrogène, il en résultait une quantité d'eau considérable. Cavendish, de la Société de Londres, est, au rapport de Blagden, secrétaire de la même Société, le premier auteur de cette observation; mais il n'alla point jusqu'à en conclure que l'eau était composée de ces deux substances. D'ailleurs, il est certain que Lavoisier, Laplace et Monge n'étaient point informés du travail de Cavendish, lorsqu'ils s'occupèrent en même temps, dans le courant du mois de juin 1783, de la même expérience, qu'ils exécutèrent, sans se communiquer, par des moyens différents. Les deux premiers, à Paris,

[1] Extrait du *Journal polytype*, du 26 février 1786. — Quoique ce travail, d'après certaines phrases, ne paraisse pas être de la main de Lavoisier, il est probable qu'il en a rédigé la plus grande partie. Ce mémoire, en effet, a été imprimé dans le *Recueil des mémoires* publiés après sa mort, et dont il préparait l'impression pendant sa détention. On constate de plus, par les manuscrits autographes, que Lavoisier donnait souvent lui-même des notes sur ses travaux à divers recueils. Ainsi l'analyse des *Opuscules physiques et chimiques*, publiée dans les *Mémoires de l'Académie*, et réimprimée par M. Dumas (*Œuvres*, t. II, p. 89), a été rédigée par Lavoisier. Le manuscrit autographe existe.

(*Note de l'éditeur.*)

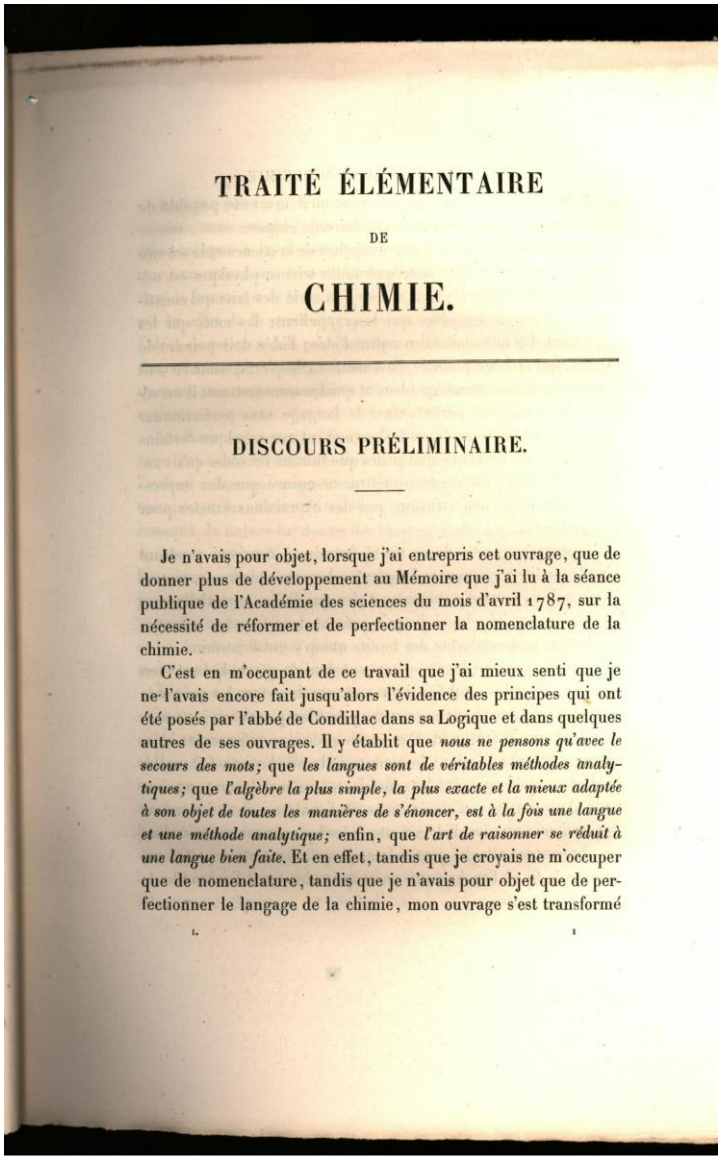
montrèrent que cette eau était parfaitement pure; le troisième, à Mézières, que son poids approchait extrêmement d'égaler celui des deux fluides réunis. Il y avait déjà quelques mois que Lavoisier seul avait obtenu une quantité très considérable d'une liqueur aussi insipide que l'eau distillée, par la combustion de l'air vital dans une bouteille pleine de gaz hydrogène[1].

Bientôt après, Lavoisier et Meusnier prouvèrent qu'on pouvait également décomposer l'eau, en lui présentant des corps combustibles sur lesquels elle pût agir dans l'état de vapeur incandescente; leurs expériences ont paru au mois de mai 1784. Depuis, ils ont entrepris de mettre ces deux vérités absolument hors de doute, en répétant les deux espèces d'expériences, avec des soins malheureusement inconnus dans les laboratoires. Ils ont en même temps décomposé l'eau très en grand, et le gaz hydrogène, que cette opération a produit, a été employé aussitôt à la recomposer. Ces expériences ont eu lieu les 28 et 29 février 1785, en présence de plus de trente savants, physiciens, géomètres et naturalistes, tant étrangers que de l'Académie des sciences, qui avait nommé pour cet effet une commission très nombreuse. Lavoisier et Meusnier se proposent d'en faire connaître incessamment les détails dans les *Mémoires de l'Académie*[2]. En attendant, l'importance de cette découverte pour les sciences les a déterminés à nous permettre d'en donner un extrait suffisamment étendu, pour lever tous les doutes qu'on pourrait avoir sur cette matière, et servir de réponse aux objections qui leur ont été faites publiquement par plusieurs physiciens, de la France, de l'Angleterre et de l'Italie.

Nous allons d'abord nous occuper de l'expérience de la décomposition, en commençant par la description rapide de l'appareil. Nous reviendrons ensuite sur chacune de ses parties, en détaillant successivement toutes les précautions d'exactitude employées pour éviter les erreurs dans les quantités et la nature des produits; enfin nous ren-

[1] Voir les *Mémoires de l'Académie des sciences*, année 1781. — [2] Ce mémoire n'a jamais été publié. (*Note de l'éditeur.*)

IMPRIMERIE NATIONALE



TRAITÉ ÉLÉMENTAIRE

DE

CHIMIE.

DISCOURS PRÉLIMINAIRE.

Je n'avais pour objet, lorsque j'ai entrepris cet ouvrage, que de donner plus de développement au Mémoire que j'ai lu à la séance publique de l'Académie des sciences du mois d'avril 1787, sur la nécessité de réformer et de perfectionner la nomenclature de la chimie.

C'est en m'occupant de ce travail que j'ai mieux senti que je ne l'avais encore fait jusqu'alors l'évidence des principes qui ont été posés par l'abbé de Condillac dans sa Logique et dans quelques autres de ses ouvrages. Il y établit que *nous ne pensons qu'avec le secours des mots;* que *les langues sont de véritables méthodes analytiques;* que *l'algèbre la plus simple, la plus exacte et la mieux adaptée à son objet de toutes les manières de s'énoncer, est à la fois une langue et une méthode analytique;* enfin, que *l'art de raisonner se réduit à une langue bien faite.* Et en effet, tandis que je croyais ne m'occuper que de nomenclature, tandis que je n'avais pour objet que de perfectionner le langage de la chimie, mon ouvrage s'est transformé

(1789)

« Toutes les substances que nous n'aurons pu décomposer par aucun moyen sont pour nous des éléments »

TABLEAU DES SUBSTANCES SIMPLES.

	Noms nouveaux.	*Noms anciens correſpondans.*
Subſtances ſimples qui appartiennent aux trois règnes & qu'on peut regarder comme les élémens des corps.	Lumière	Lumière.
	Calorique	Chaleur. Principe de la chaleur. Fluide igné. Feu. Matière du feu & de la chaleur.
	Oxygène	Air déphlogiſtiqué. Air empiréal. Air vital. Baſe de l'air vital.
	Azote	Gaz phlogiſtiqué. Mofete. Baſe de la mofete.
	Hydrogène	Gaz inflammable. Baſe du gaz inflammable.
Subſtances ſimples non métalliques oxidables & acidifiables.	Soufre	Soufre.
	Phoſphore	Phoſphore.
	Carbone	Charbon pur.
	Radical muriatique	Inconnu.
	Radical fluorique	Inconnu.
	Radical boracique	Inconnu.
Subſtances ſimples métalliques oxidables & acidifiables.	Antimoine	Antimoine.
	Argent	Argent.
	Arſenic	Arſenic.
	Biſmuth	Biſmuth.
	Cobolt	Cobolt.
	Cuivre	Cuivre.
	Etain	Etain.
	Fer	Fer.
	Manganèſe	Manganèſe.
	Mercure	Mercure.
	Molybdène	Molybdène.
	Nickel	Nickel.
	Or	Or.
	Platine	Platine.
	Plomb	Plomb.
	Tungſtène	Tungſtène.
	Zinc	Zinc.
Subſtances ſimples ſalifiables terreuſes.	Chaux	Terre calcaire, chaux.
	Magnéſie	Magnéſie, baſe du ſel d'Epſom.
	Baryte	Barote, terre peſante.
	Alumine	Argile, terre de l'alun, baſe de l'alun.
	Silice	Terre ſiliceuſe, terre vitrifiable.

Le modèle de Dalton (1766-1844)

En 1808 exhume la théorie de Démocrite

✓ Chaque élément est formé de petites particules appelées atomes. L'atome est indivisible.

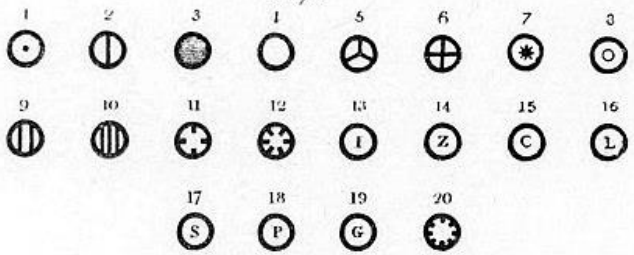
✓ Les atomes d'un élément donné sont identiques (masse et autres propriétés); les atomes d'éléments différents sont différents à un ou plusieurs points de vue.

✓ Il y a formation de composés chimiques quand les atomes se combinent les uns aux autres. Un composé donné contient toujours les mêmes nombres relatifs et les mêmes types d'atomes.

✓ Les atomes d'éléments différents peuvent se combiner selon diverses proportions. C'est ce qui donna lieu à sa réputée loi des proportions multiples (*pierre angulaire de la chimie moderne*).

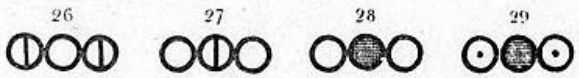
✓ Dans une réaction chimique, il y a réorganisation des atomes, c'est-à-dire modification de la façon dont ils sont liés les uns aux autres. Les atomes eux-mêmes ne subissent aucune modification au cours de la réaction chimique. L'atome ne peut être ni créé ni détruit lors de réactions chimiques.

Simple

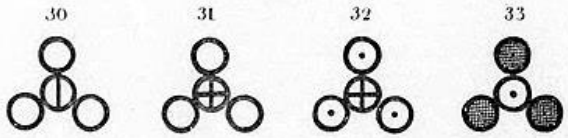


Binary

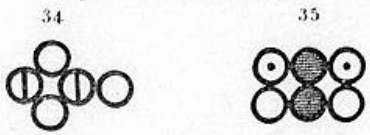
Ternary



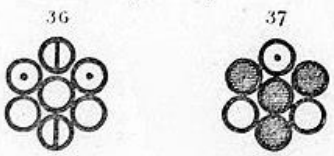
Quaternary



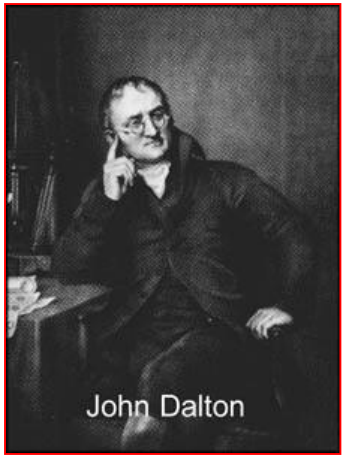
Quinquenary & Sextenary



Septenary



Le modèle de Dalton (1766-1844)



✓ En 1808, Dalton dresse la liste des masses atomiques d'un certain nombre d'éléments rapportés à **la masse de l'hydrogène**.

✓ Ses masses forment la base de la **table périodique** moderne des éléments (suite de symboles pour les 36 éléments simples connus).

Les atomes de chaque élément ont une identité reconnue, leur masse

✓ Loi des pressions partielles des mélanges gazeux (loi de Dalton), selon laquelle la pression totale exercée par un mélange de gaz est égale à la somme des pressions individuelles qu'exercerait chacun des gaz s'il occupait seul le volume entier.

✓ Dalton est arrivé à sa théorie atomique par une étude des propriétés physiques de l'air atmosphérique et des autres gaz.

✓ Le « Dalton » équivaut au douzième de la masse d'un atome de carbone 12, et exprime la masse d'un atome d'hydrogène. Il est égal à $1.66\ 10^{-27}$ kg.

Amedeo Avogadro (1776-1856)

Le nombre d'Avogadro doit son nom au physicien italien **Amedeo Avogadro**, qui a postulé en **1811** qu'à une température et une pression données, tous les gaz ont le même volume molaire. Autrement dit, à des températures et des pressions identiques, des volumes égaux de gaz contiennent le même nombre de molécules: **c'est la loi d'Avogadro**.

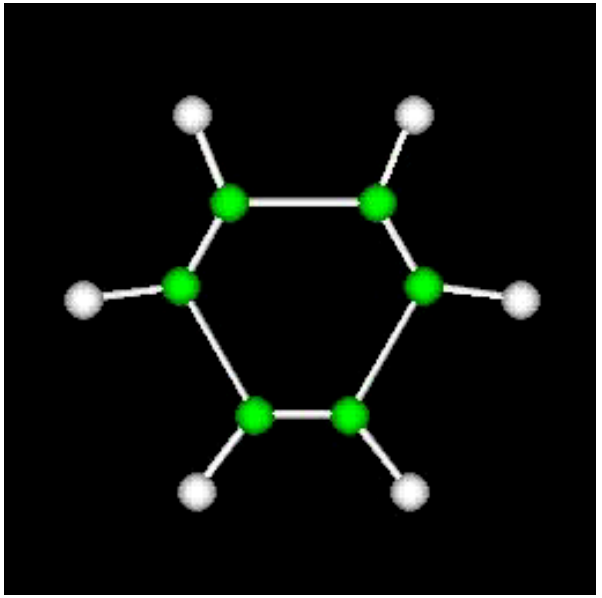
Dans les conditions normales de température (0 °C) et de pression (1 atm ou 101 325 Pa), une mole de gaz occupe un volume de 22,4 L (volume molaire) et renferme $N = 6{,}023 \times 10^{23}$ molécules (nombre d'Avogadro).

→ estimé par **Loschmidt** en **1865** → mesuré par **Perrin** en **1911**

Friedrich August Kekulé von Stradonitz, (1829-1896)

✓ Il découvre la forme cyclique du Benzène C_6H_6

Modes vibratoires de Kekulé



Kekulé organise le premier congrès International de Chimie à *Karlsruhe* en 1860.140 savants de tous pays y assistèrent dont Mendeleïev...

https://youtu.be/NA9etutSt7A

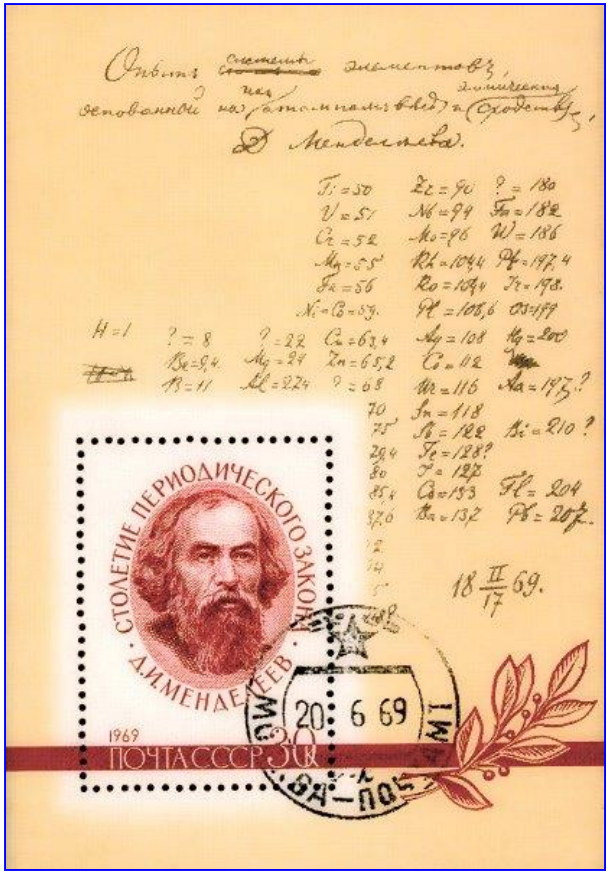
Dmitri Ivanovitch Mendeleïev (1834-1907)

63 éléments connus à l'époque 1869

- ✓ Classification périodique des éléments
- ✓ Il prévoit des éléments inconnus

  gallium, germanium, scandium
- ✓ Rédaction des Principes de la chimie (1870)

Les atomes sont maintenant identifiés et classés !



Dmitri Ivanovitch Mendeleïev (1834-1907)

ОПЫТЪ СИСТЕМЫ ЭЛЕМЕНТОВЪ.

ОСНОВАННОЙ НА ИХЪ АТОМНОМЪ ВѢСѢ И ХИМИЧЕСКОМЪ СХОДСТВѢ.

			Ti = 50	Zr = 90	? = 180.
			V = 51	Nb = 94	Ta = 182.
			Cr = 52	Mo = 96	W = 186.
			Mn = 55	Rh = 104,4	Pt = 197,1.
			Fe = 56	Ru = 104,4	Ir = 198.
			Ni = Co = 59	Pl = 106,6	Os = 199.
H = 1			Cu = 63,4	Ag = 108	Hg = 200.
	Be = 9,4	Mg = 24	Zn = 65,2	Cd = 112	
	B = 11	Al = 27,4	? = 68	Ur = 116	Au = 197?
	C = 12	Si = 28	? = 70	Sn = 118	
	N = 14	P = 31	As = 75	Sb = 122	Bi = 210?
	O = 16	S = 32	Se = 79,4	Te = 128?	
	F = 19	Cl = 35,6	Br = 80	I = 127	
Li = 7	Na = 23	K = 39	Rb = 85,4	Cs = 133	Tl = 204.
		Ca = 40	Sr = 87,6	Ba = 137	Pb = 207.
		? = 45	Ce = 92		
		?Er = 56	La = 94		
		?Yt = 60	Di = 95		
		?In = 75,6	Th = 118?		

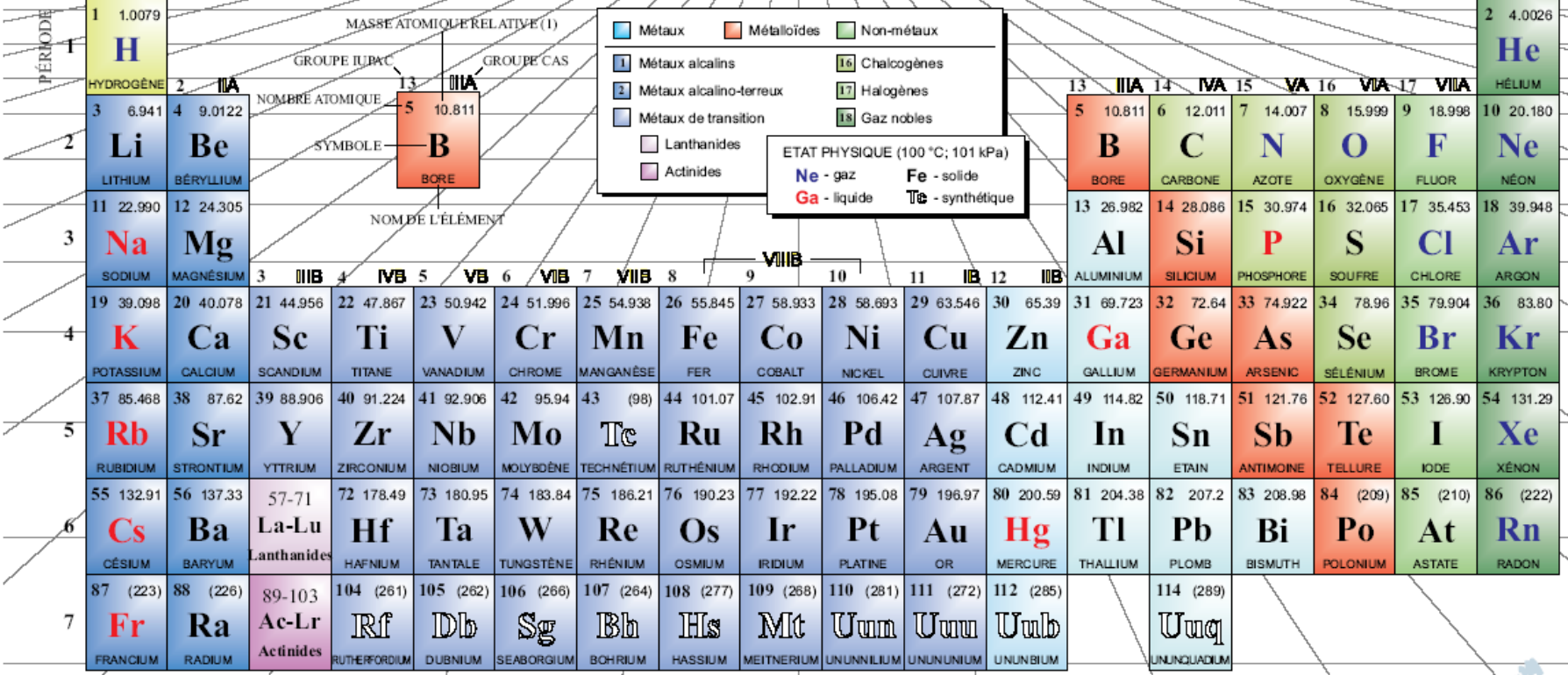
Д. Менделѣевъ

le 6 mars 1869, une présentation formelle fut faite par Mendeleïev à la société russe de chimie, intitulée: La dépendance entre les propriétés des masses atomiques des éléments, énonçant :

- Les éléments lorsqu'ils sont disposés selon leurs poids atomiques, montrent une périodicité apparente de leurs propriétés.
- Les éléments qui sont semblables en ce qui concerne leurs propriétés chimiques ont des poids atomiques qui sont peu ou prou de la même valeur (par exemple Pt, Ir, Os) ou qui augmentent régulièrement (par exemple K, Rb, Cs).
- L'arrangement des éléments, ou des groupes d'éléments dans l'ordre de leurs poids atomiques, correspond à leurs prétendues valences, aussi bien que, dans une certaine mesure, à leurs propriétés chimiques distinctives.
- Les éléments qui sont le plus largement représentés ont de petits poids atomiques.
- L'importance du poids atomique détermine le caractère de l'élément, de même que l'importance de la molécule détermine le caractère d'un corps composé.
- Nous devons nous attendre à la découverte de nombreux éléments jusqu'ici inconnus. Par exemple des éléments analogues à l'aluminium et au silicium dont la masse atomique serait comprise entre 65 et 75.
- La masse atomique d'un élément peut parfois être modifiée par une connaissance de la masse de ses éléments contigus. Ainsi, le poids atomique du tellure doit se trouver entre 123 et 126, et ne peut pas être 128.
- Certaines propriétés caractéristiques des éléments peuvent être prévues à partir de leur masse atomique.

TABLEAU PÉRIODIQUE DES ÉLÉMENTS

http://www.ktf-split.hr/periodni/fr/



LANTHANIDES

57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
138.91	140.12	140.91	144.24	(145)	150.36	151.96	157.25	158.93	162.50	164.93	167.26	168.93	173.04	174.97
La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
LANTHANE	CÉRIUM	PRASÉODYME	NÉODYME	PROMÉTHIUM	SAMARIUM	EUROPIUM	GADOLINIUM	TERBIUM	DYSPROSIUM	HOLMIUM	ERBIUM	THULIUM	YTTERBIUM	LUTÉTIUM

ACTINIDES

89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103
(227)	232.04	231.04	238.03	(237)	(244)	(243)	(247)	(247)	(251)	(252)	(257)	(258)	(259)	(262)
Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr
ACTINIUM	THORIUM	PROTACTINIUM	URANIUM	NEPTUNIUM	PLUTONIUM	AMÉRICIUM	CURIUM	BERKÉLIUM	CALIFORNIUM	EINSTEINIUM	FERMIUM	MENDELÉVIUM	NOBÉLIUM	LAWRENCIUM

(1) Pure Appl. Chem., **73**, No. 4, 667-683 (2001)

La masse atomique relative est donnée avec cinq chiffres significatifs. Pour les éléments qui n'ont pas de nucléides stables, la valeur entre parenthèses indique le nombre de masse de l'isotope de l'élément ayant la durée de vie la plus grande.

Toutefois, pour les trois éléments Th, Pa et U qui ont une composition isotopique terrestre connue, une masse atomique est indiquée.

Editor: Michel Dirla

Copyright © 1998-2003 EniG. (eni@ktf-split.hr)

Toutes ces découvertes relancèrent l'intérêt pour l'étude des corrélations entre les propriétés des éléments. En 1864, le chimiste britannique **John A.R. Newlands** établit le classement des éléments dans l'ordre croissant des masses atomiques, et remarqua qu'un groupe donné de propriétés se retrouve tous les huit éléments. Il appela cette répétition périodique la *loi des octaves*, par analogie avec les gammes musicales. La découverte de Newlands ne parvint pas à impressionner ses contemporains, probablement parce que la périodicité observée était limitée à un petit nombre d'éléments connus.

Le mouvement brownien

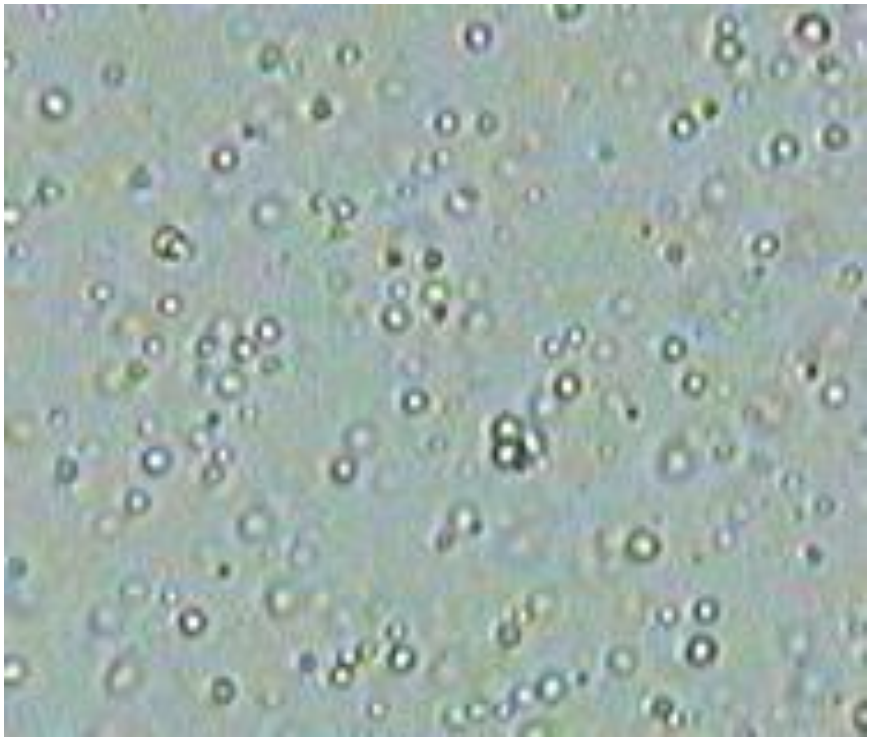
« Il devient difficile de nier la réalité objective des molécules »

Le botaniste Robert Brown en 1827

Connu aussi pour sa découverte des noyaux des cellules végétales

Observe le mouvement erratique des grains de pollen à la surface de l'eau

Champ du microscope



https://videotheque.cnrs.fr/doc=2080

Vidéo historique

R. Brown (1828)

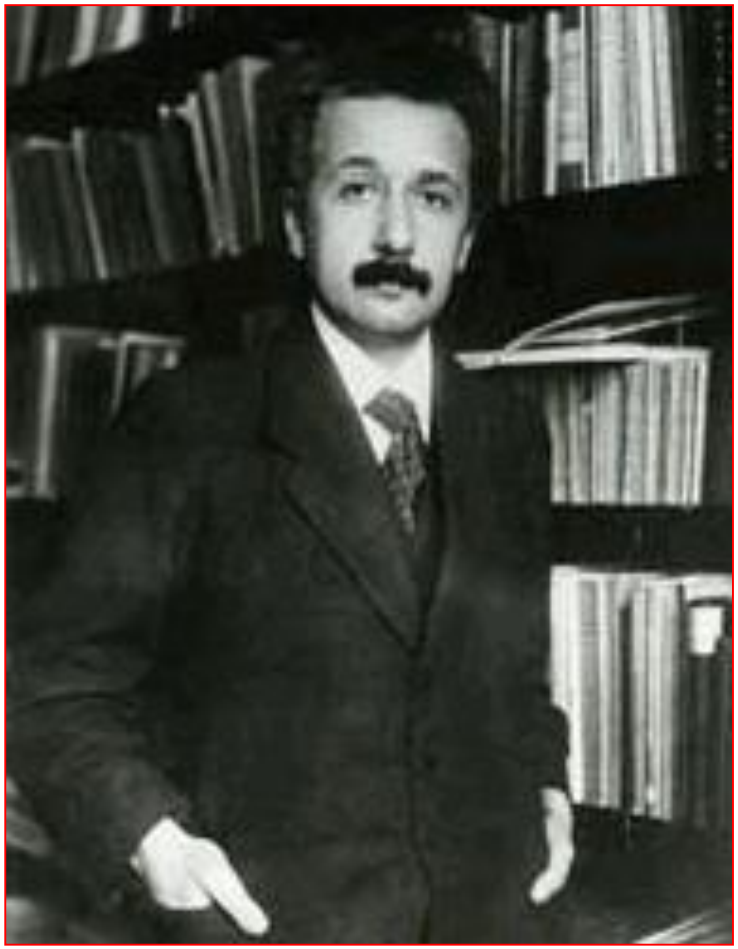
- *Principe vital ?*
- *Origine du mouvement dans les particules elles-mêmes ou dans le fluide ?*
- *Il pense d'abord que ce mouvement est dû à la vie…*
- *Il constate qu'on observe le même phénomène avec des poussières minérales.*

Il est soutenu par Faraday

- Louis-Georges Gouy (1888)

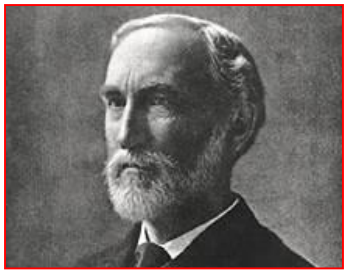
- *Plus les particules sont petites, plus le mouvement est vif*
- *Le mouvement est plus actif dans les fluides les moins visqueux et à plus haute température*
- *Le mouvement ne s'arrête jamais*

Einstein 1905



Un peu de polémique…

A la fin de sa vie Einstein racontera qu'il n'avait jamais entendu parler du mouvement brownien et qu'il avait ignoré les travaux de **Gibbs** et de **Boltzmann**…



un peu exagéré …

3. Le mouvement brownien

(1905)

L'article qui suit ne traite pas de théorie quantique. Mais son lien avec le précédent, paru la même année, est étroit, car il reflète lui aussi la conception originale qu'avait Einstein de la thermodynamique statistique. Il est sans doute bon de rappeler que, même en 1905, l'hypothèse moléculaire, en dépit du grand usage qu'en faisaient les chimistes et en dépit du poids des travaux de Maxwell et de Boltzmann, ne faisait pas encore l'unanimité. Les énergétistes (avec à leur tête Ostwald) préféraient une image continuiste des phénomènes, et, de son côté, Mach refusait une hypothèse trop éloignée des données empiriques. Malgré l'admiration affirmée qu'il portait à certaines des idées de Mach, Einstein était évidemment d'un avis tout contraire : pour lui, la théorie cinétique de Maxwell-Boltzmann — dans la mesure où les molécules y sont traitées comme des masses ponctuelles dont le mouvement est régi par la mécanique — devait être considérée comme le succès le plus spectaculaire des conceptions de la mécanique newtonienne.

Il n'avait pas échappé à Boltzmann qu'une conséquence naturelle de la structure atomique de la matière était la possibilité de fluctuations des grandeurs thermodynamiques autour de leur valeur théorique. Cependant, Boltzmann pensait que ces fluctuations, très petites, étaient inobservables ; il faisait même dépendre la validité de son approche statistique de cette inobservabilité des fluctuations. Planck allait encore plus loin : il pensait que les lois macroscopiques de la thermodynamique devaient être absolues, et donc que les processus microscopiques conduisant à des fluctuations décelables devaient être exclus a priori. *Einstein, par contre, savait, pour avoir approfondi dans ses travaux de 1903-1904 le lien entre thermodynamique et dynamique, qu'il n'était pas possible d'exclure les fluctuations. Aussi chercha-t-il, au contraire, à imaginer une situation empirique où les fluctuations seraient observables. On a vu qu'il commença en 1904 par penser que seul le rayonnement offrait une situation de ce type. Puis, en 1905, il eut l'idée de chercher du côté du mouvement brownien qui, bien que connu depuis longtemps, attendait encore une explication détaillée.*

De fait, les études expérimentales antérieures du mouvement brownien n'avaient permis de dégager aucune régularité, tout simplement parce que personne, avant Einstein, n'avait eu l'idée d'étudier la caractéristique dont Einstein dégagea l'importance : le déplacement quadratique moyen des particules (autrement dit, leur fluctuation autour d'une position moyenne) en fonction du temps.

Les articles d'Einstein sur le mouvement brownien, contrairement à celui sur les quanta lumineux, reçurent un accueil favorable parmi les physiciens. En 1908, Jean Perrin vérifia avec une grande précision les formules quantitatives démontrées par Einstein. Ces expériences eurent pour effet de convaincre les derniers énergétistes, dont Ostwald lui-même, de la réalité des molécules. Mach, quant à lui, mourut en 1916, sans avoir trouvé son chemin de Damas. Cependant qu'en 1924, dans la quatrième édition de son livre Les Atomes, *Jean Perrin écrivait : « La théorie atomique a triomphé. Nombreux encore naguère, ses adversaires enfin conquis renoncent l'un après l'autre aux défiances qui longtemps furent légitimes et sans doute utiles. »*

Mais, pour Einstein, l'essentiel n'était pas là. A propos de son travail sur le mouvement brownien, il disait en 1915 : « Sa signification essentielle se situe au niveau des principes (...) on voit directement au microscope une partie de l'énergie thermique sous forme d'énergie mécanique. » Autrement dit, comme l'indique Einstein dans son paragraphe introductif de l'article qui suit, le deuxième principe de la thermodynamique, selon lequel il est impossible d'obtenir spontanément du travail à partir d'une source unique de chaleur, ne vaut plus à l'échelle des dimensions du même ordre de grandeur que le pouvoir de résolution du microscope (quelques microns). La thermodynamique est donc bien, comme l'avait indiqué Boltzmann, une théorie limite.

BIBLIOGRAPHIE

Brush, S.G., *The Kind of Motion We Call Heat — History of the Kinetic Theory of Gazes in the 19th Century*, Amsterdam, North Holland, 1976.

—, « A history of random processes. I. Brownian movement from Brown to Perrin », *Archives for History of Exact Sciences*, vol. V, 1968-1969, p. 1-36.

Jech, B., « Autopsie d'une erreur : à propos de la thèse de doctorat d'Einstein », *Fundamanta Scientiae*, vol. IX, 1988, p. 55-95.

Nye, M.J., « Molecular reality, a perspective in the scientific work of Jean Perrin », Londres et New York, 1972.

Mouvement des particules en suspension dans un fluide au repos, comme conséquence de la théorie cinétique moléculaire de la chaleur

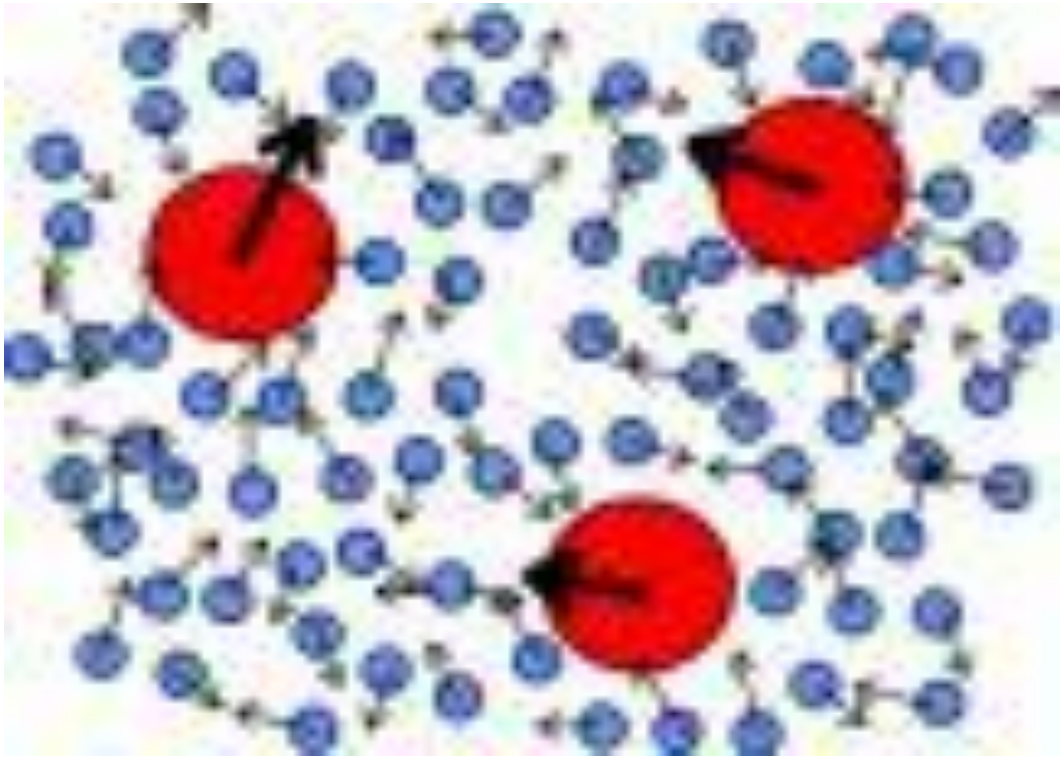
[Annalen der Physik, *vol. XVII, 1905, p. 549-560.*]

L'article (traduit en français) peut se trouver sur internet

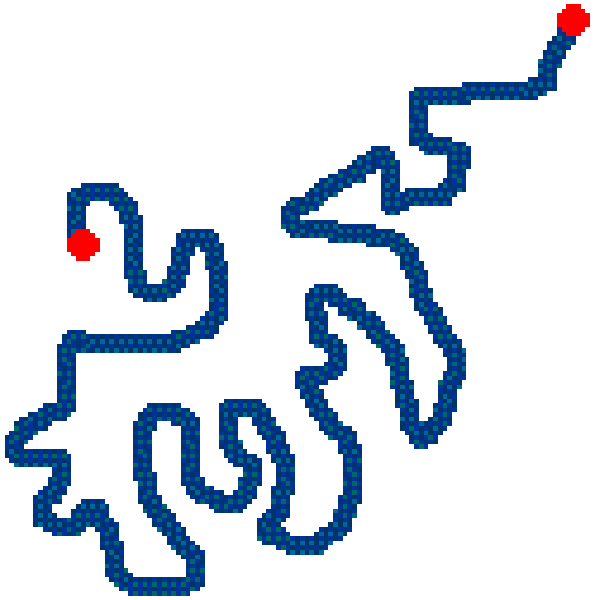
l’hypothèse moléculaire cinétique

- Objectif: Trouver une preuve expérimentalement vérifiable de l’existence de molécules de taille bien définie.
- Les particules sont suffisamment petites pour subir l’agitation thermique.
- Les particules sont suffisamment grosses pour être observées au microscope.
- Il identifie « la bonne variable »: non pas la vitesse instantanée, mais la distance moyenne parcourue pendant un temps fini donné.

Particules browniennes subissant des collisions des atomes

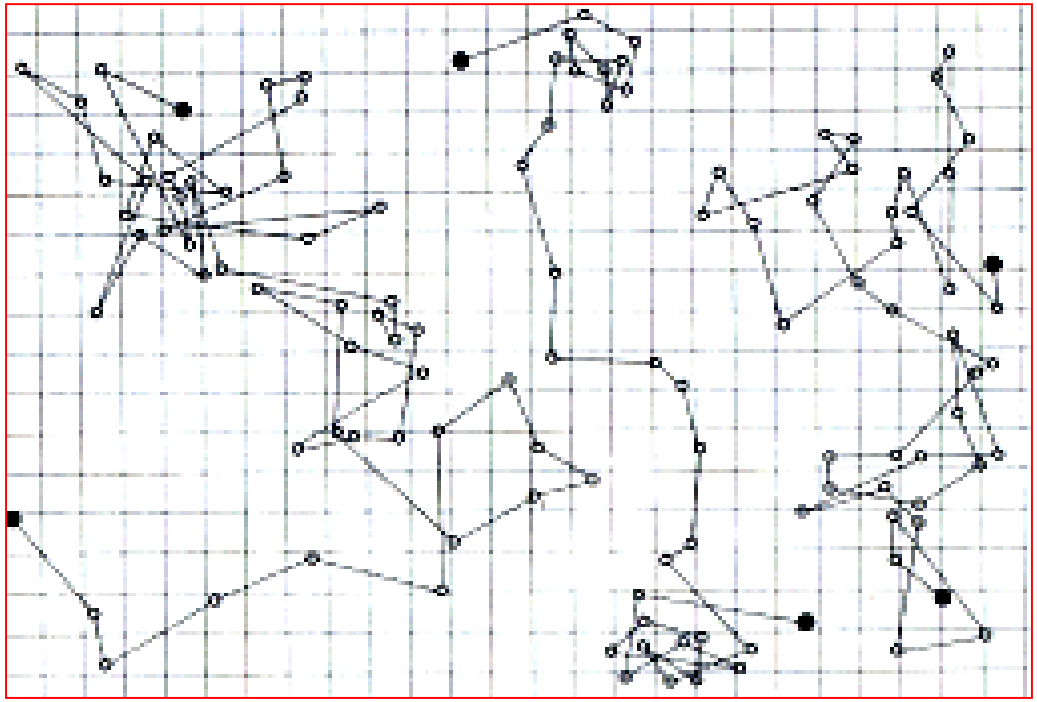


Observation de la trajectoire d'une particule brownienne



Le grain « *ne se souvient plus* » pendant le deuxième intervalle de temps de ce qu'il a fait pendant le premier.

C'est une marche aléatoire
C'est la marche de l'ivrogne
C'est une chaîne de Markov…



Prédictions d'Einstein

$$\overline{X^2} = 2Dt$$

moyenne du carré des positions

$$D = \alpha \frac{T}{N a \eta}$$

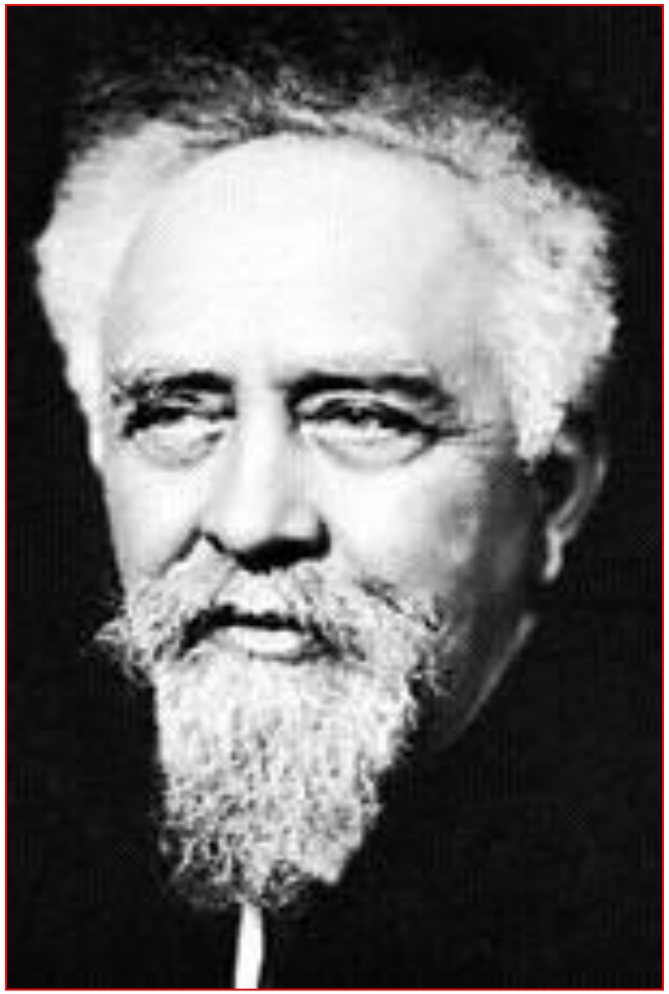
coefficient de diffusion

T: température
a: rayon du grain
η: viscosité du liquide
α: constante

$$N = \frac{2\alpha T t}{a \eta \overline{X^2}}$$

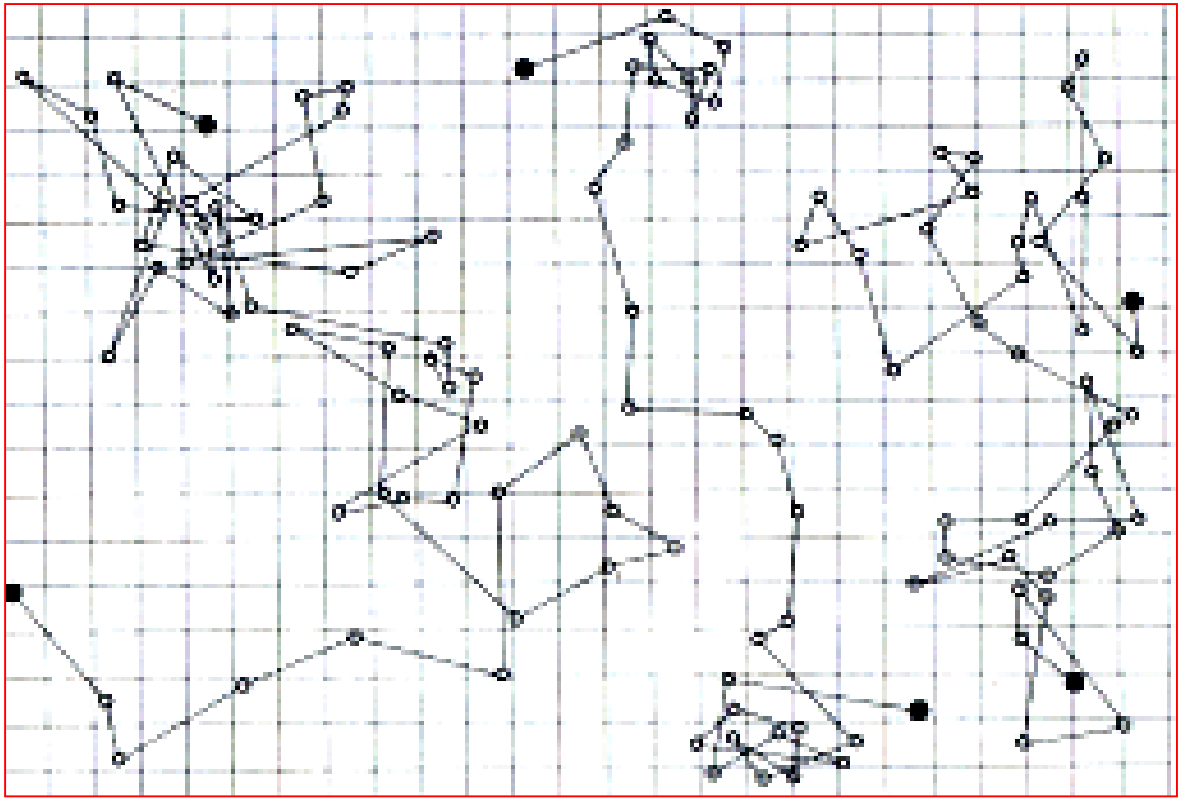
nombre d'Avogadro

Jean Perrin 1909



Jean Perrin (1870-1942), physicien français, prix Nobel de physique en 1926 pour ses travaux sur l'atome.

Mouvement brownien observé par Jean Perrin en 1909



Détermination du nombre d'Avogadro

100 z	Nature de l'émulsion	Rayon des grains	Masse $m.\ 10^{15}$	Déplacements utilisés	$\frac{N}{10^{22}}$
		μ			
1	I. Gomme-gutte	0,50	600	100	80
1	II. Gomme-gutte	0,212	48	900	69,5
4 à 5	III. Mêmes grains dans eau sucrée (35 p. 100) (température mal connue)	0,212	48	400	55
1	IV. Mastic	0,52	650	1.000	72,5
1,2	V. Grains énormes (mastic) suspendus dans solution d'urée ...	5,50	750.000	100	78
125	VI. Gomme-gutte dans glycérine (1/10 d'eau)	0,385	290	100	64
1	VII. Grains de gomme-gutte bien égaux ..... (deux séries)	0,367	246	1.500 120	69 64

Les mesures les plus soignées (série VII) se rapportent aux grains les plus égaux que j'ai préparés. La préparation et l'objectif (à immersion) étaient noyés dans l'eau, ce qui permet la mesure exacte de la température (et par suite de la viscosité). Les rayons éclairants, assez faibles, étaient filtrés par une cuve d'eau. L'émulsion était très diluée. Le microscope était mis au point sur le niveau (6 μ au-dessus du fond) dont la hauteur h est telle qu'un grain de la taille considérée a même probabilité pour se trouver au-dessus ou au-dessous de ce niveau. Pour ne pas être tenté de choisir des grains par hasard un peu plus visibles (c'est-à-dire un peu plus gros que la moyenne), je suivais le premier grain qui se présentait dans le centre du champ. Puis je déplaçais latéralement la préparation, suivais de nouveau le premier grain qui se présentait et ainsi de suite. J'avais ainsi obtenu la valeur 69. Mais une cause d'erreur m'a été

LES ATOMES

✓ Jean Perrin est un partisan de la théorie atomiste.

✓ On est (~1905) en plein dans la période de la controverse Mach-Boltzmann.

✓ Il va mesurer la constante d'Avogadro et par là-même démontrer le bien fondé des hypothèses atomiques et moléculaires.

Comme dira **Max Born**:

« *ce travail a contribué, plus qu'aucun autre, à convaincre les physiciens de la réalité des atomes et des molécules, de la théorie de la chaleur, et du rôle fondamental joué par les probabilités dans les lois de la nature* »

Jean Perrin:

« Il devient difficile de nier la réalité objective des molécules »

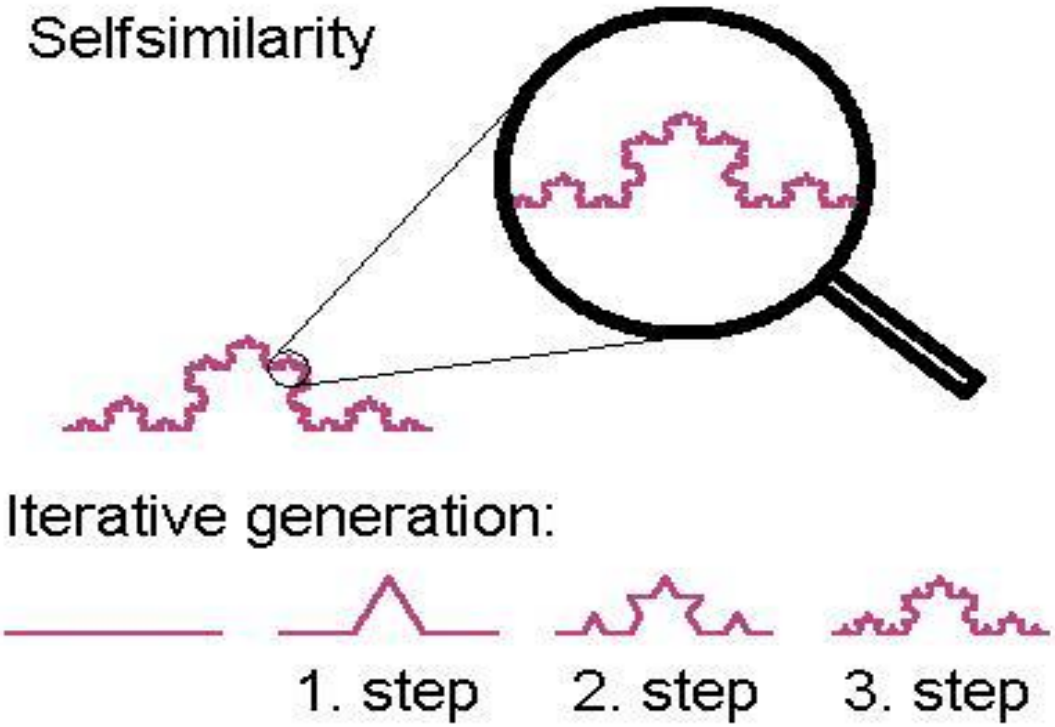
Dans un article de vulgarisation sur la discontinuité de la matière, il évoque les « courbes sans tangente » de Weierstrass (1872) …

Weierstrass

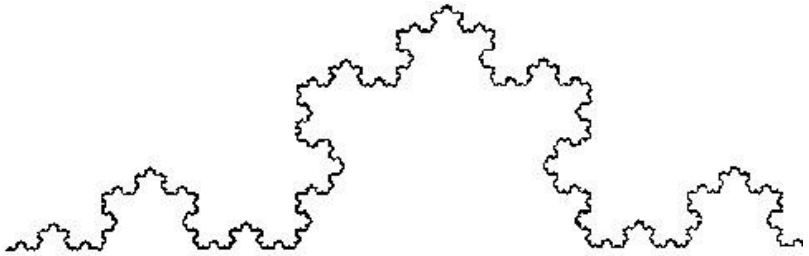
→ Courbes fractales

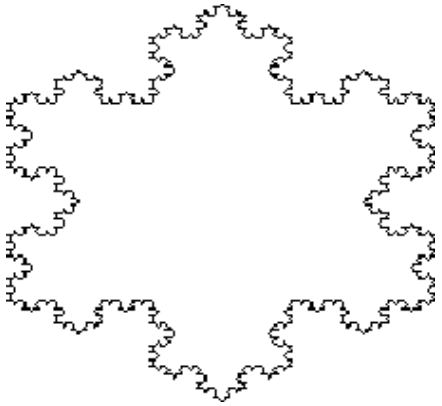
Attention à la rigueur weierstrassienne !!

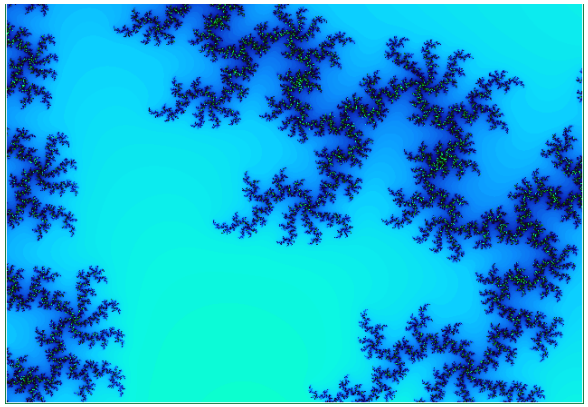
Auto similarité



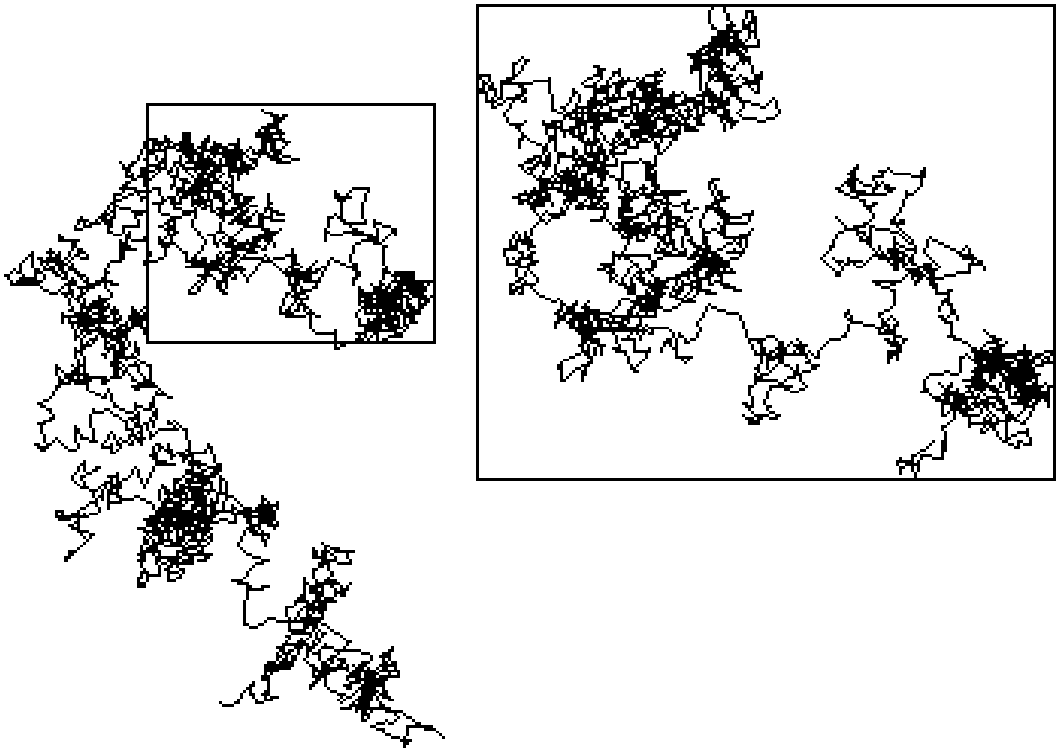
Courbes fractales de Koch



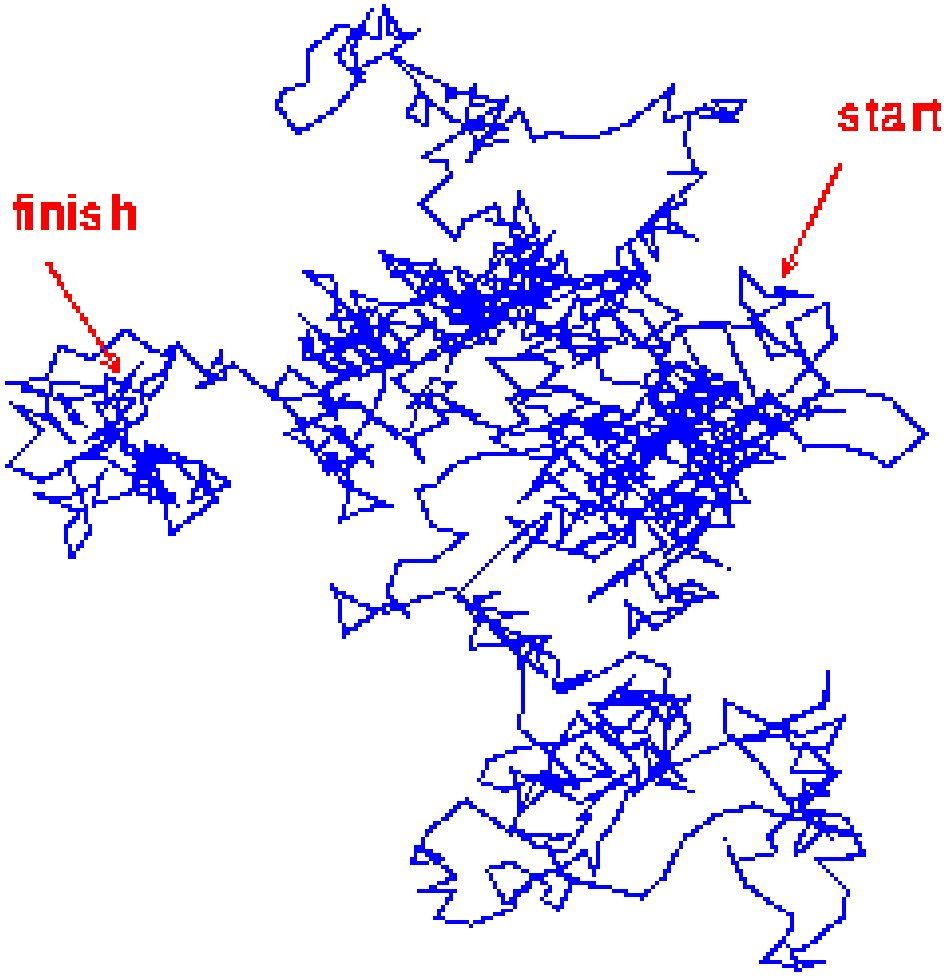




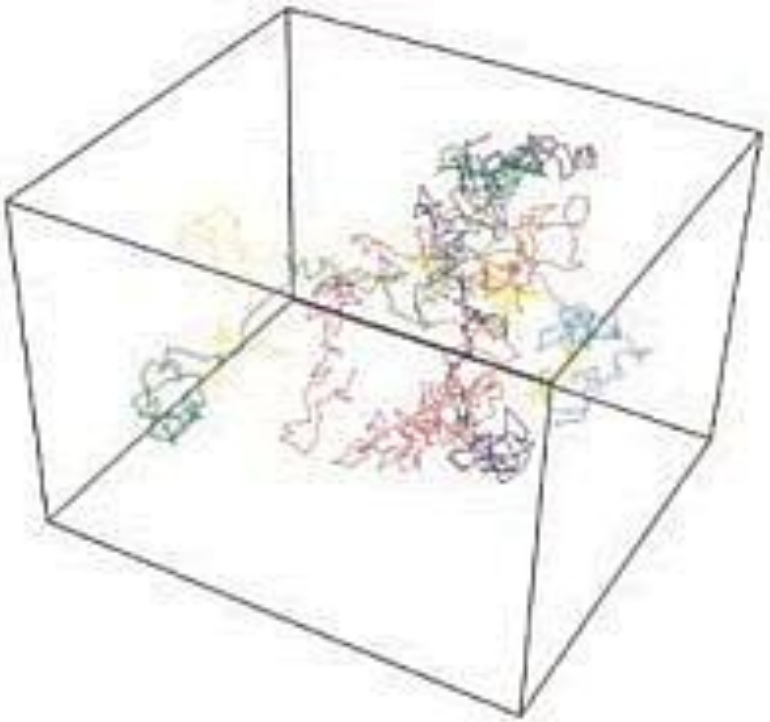
Auto-similarité: dimension fractale 2



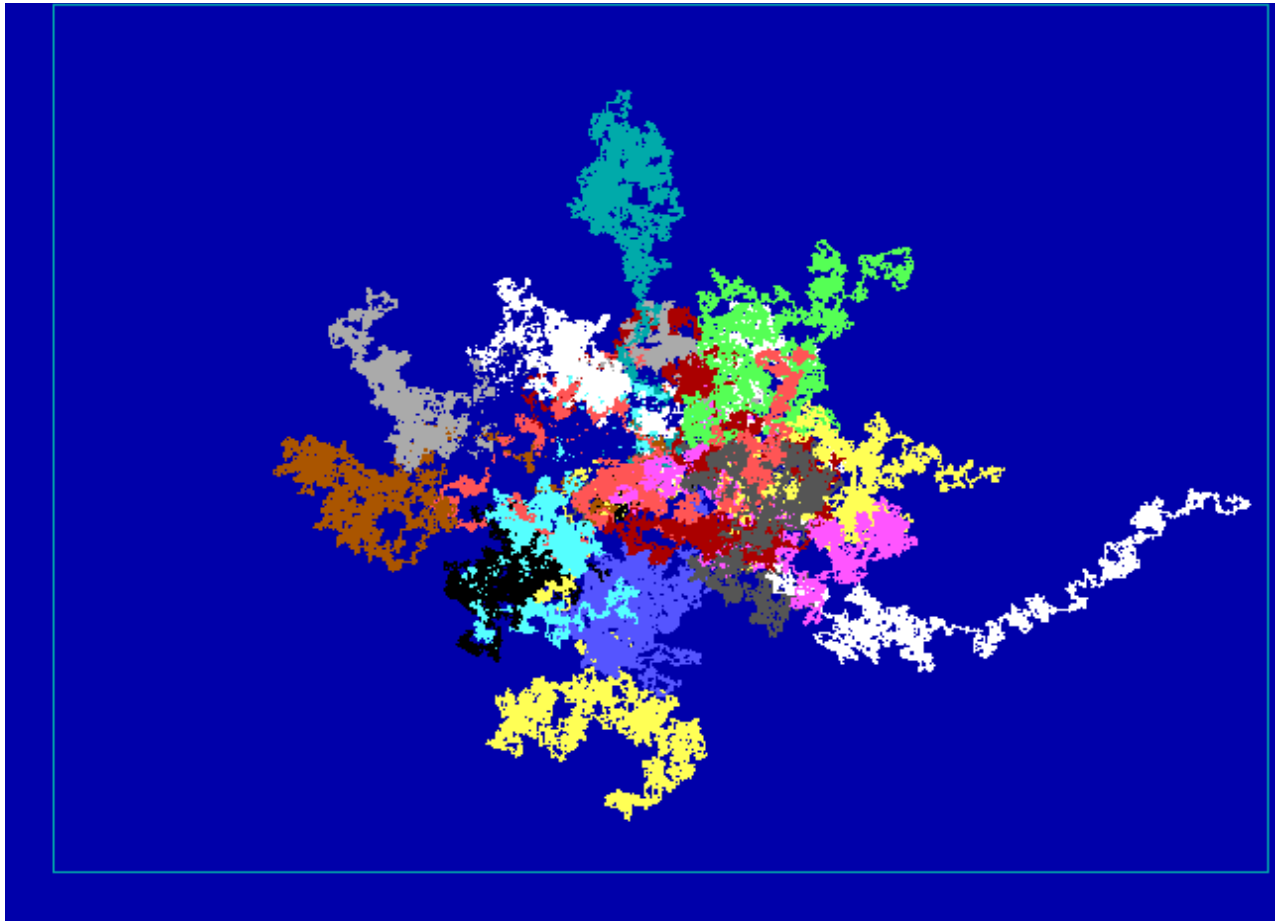
Promenade aléatoire à 2 dimensions



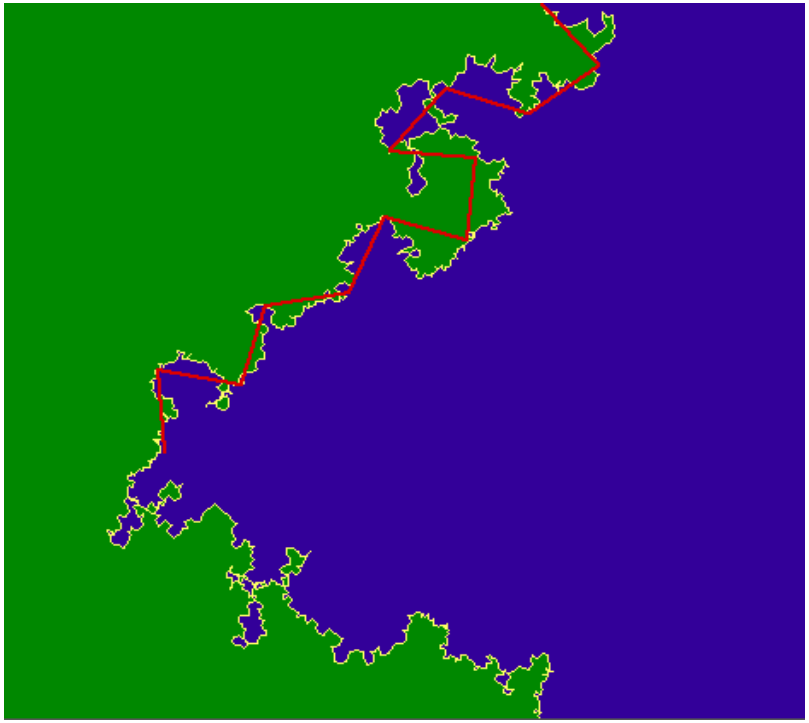
Promenade aléatoire à 3 dimensions



Mouvement brownien de 10 particules



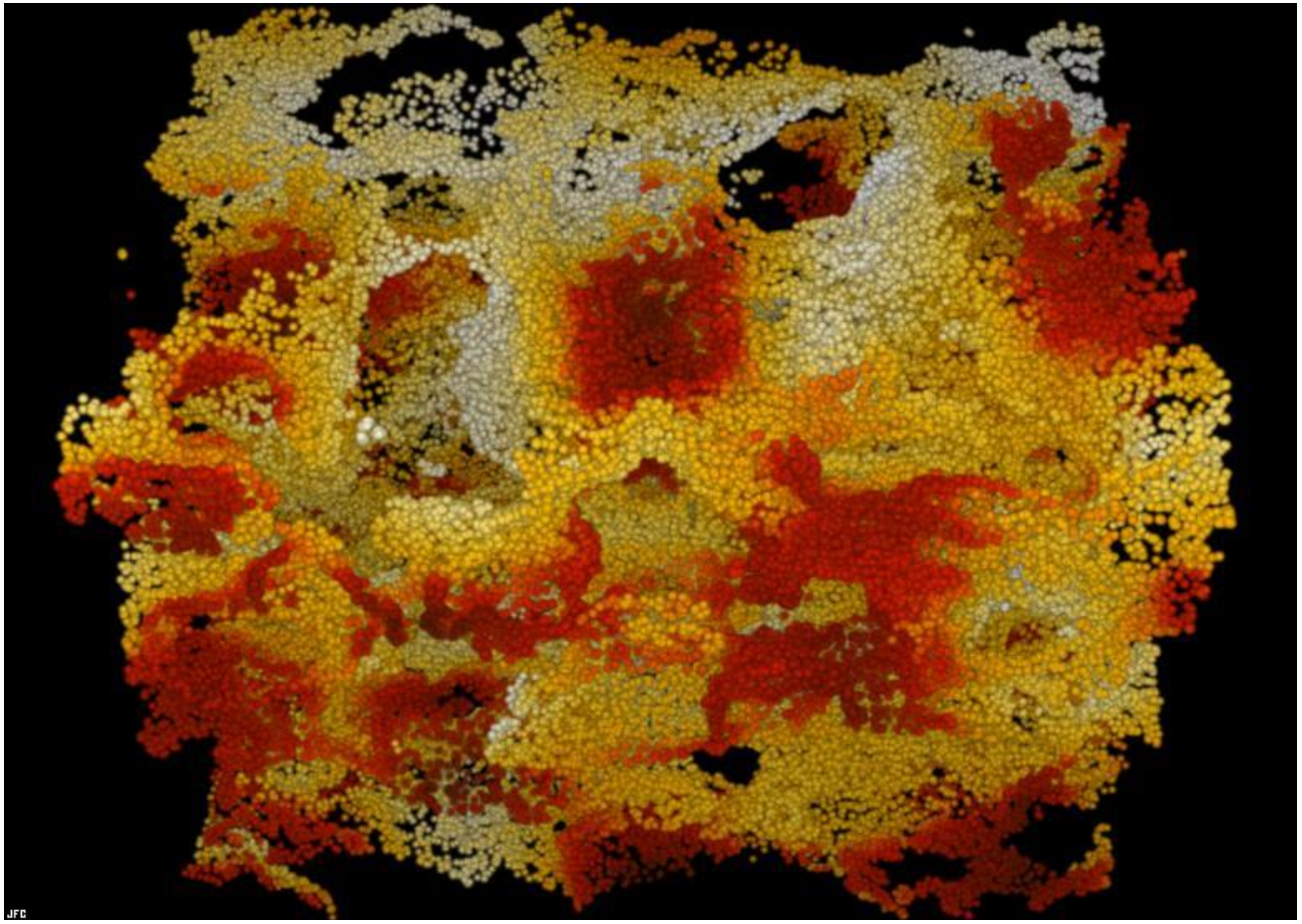
Côte et objets naturels fractals



Benoît Mandelbrot

Les objets fractals: forme, hasard et dimension
Flammarion (*Collection Champs*)

Objet fractal à 3D



Louis Bachelier 1900

Il est considéré aujourd'hui comme le précurseur de la théorie mathématique des processus stochastiques en temps continu…

La bourse
et le mouvement brownien

Ainsi, les variations des cours sont semblables au mouvement des particules de pollen observés par Brown, la probabilité d'une hausse des cours étant égale à la probabilité d'une hausse des cours comme la probabilité de déplacements des grains de pollen est égale dans toutes les directions. "Le cours coté [à un instant donné] est le cours pour lequel il y a autant d'acheteurs que de vendeurs; les acheteurs croient à la hausse, les vendeurs à la baisse. Le marché, c'est à dire l'ensemble des spéculateurs, ne croit ni à la hausse ni à la baisse, puisque pour le cours coté, il y autant d'acheteurs que de vendeurs; il considère donc le cours coté comme représentant la valeur réelle du titre considéré."

Travail antérieur au travail d'Einstein !

« Les avantages auxquels je fais allusion n'ont pas échappé à mon illustre maître Henri Poincaré, c'est lui qui s'est intéressé à mes études et qui les a fait publier. C'est grâce à lui que je les ai exposées pendant des années à la faculté des sciences de Paris. »
(la spéculation et le calcul des probabilités 1928)

Les membres du jury de thèse de Bachelier

Joseph Boussinesq

Paul Appell

Henri Poincaré

Paul Émile Appell (1855, Strasbourg – 1930, Paris) est un mathématicien français et un scientifique engagé.

Professeur puis doyen de la Faculté des sciences de Paris, recteur de l'académie de Paris, président du conseil de l'université de Paris, il est membre de l'Académie des sciences.

Ses travaux mathématiques s'étendent à la géométrie projective, aux fonctions algébriques, aux équations différentielles, à l'analyse complexe.

Paul Appell est par ailleurs un scientifique engagé pour la justice, la promotion de la recherche et la solidarité nationale et internationale.

Il s'engage pour Dreyfus en signant et promouvant le Manifeste des intellectuels de 1898, puis en intervenant à la révision du procès en 1906 ; pour la recherche en créant le fonds d'aide à la recherche scientifique, précurseur du CNRS, et en présidant la conférence française pour la propriété scientifique ; pour la solidarité en créant le Secours national ; pour l'internationalisation des facultés en créant la Cité internationale universitaire de Paris et en enseignant à Rome et à l'université Harvard ; pour la Société des Nations en présidant l'association française pour la Société des Nations.

PREMIÈRE THÈSE.

THÉORIE
DE
LA SPÉCULATION.

INTRODUCTION.

Les influences qui déterminent les mouvements de la Bourse sont innombrables, des événements passés, actuels ou même escomptables, ne présentant souvent aucun rapport apparent avec ses variations, se répercutent sur son cours.

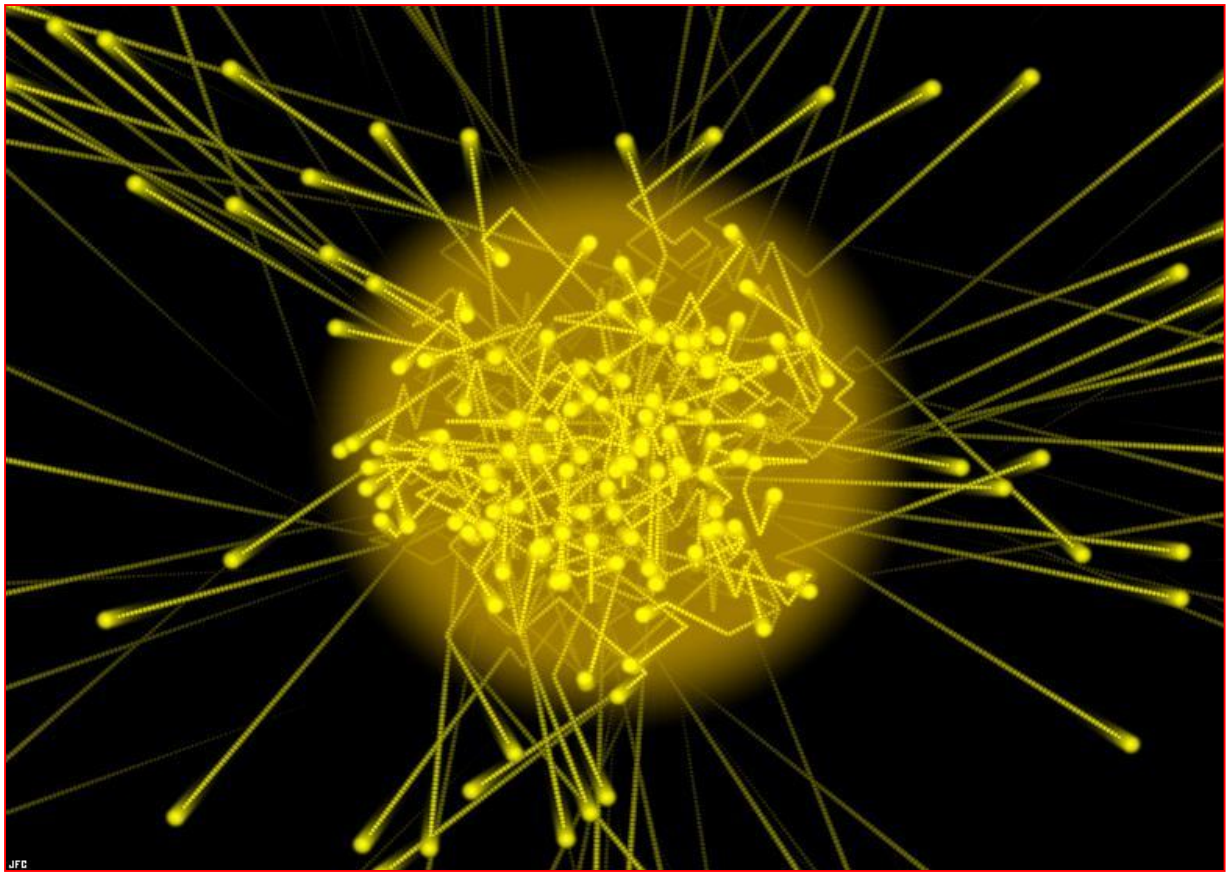
A côté des causes en quelque sorte naturelles des variations, interviennent aussi des causes factices : la Bourse agit sur elle-même et le mouvement actuel est fonction, non seulement des mouvements antérieurs, mais aussi de la position de place.

La détermination de ces mouvements se subordonne à un nombre infini de facteurs : il est dès lors impossible d'en espérer la prévision mathématique. Les opinions contradictoires relatives à ces variations se partagent si bien qu'au même instant les acheteurs croient à la hausse et les vendeurs à la baisse.

Le Calcul des probabilités ne pourra sans doute jamais s'appliquer aux mouvements de la cote et la dynamique de la Bourse ne sera jamais une science exacte.

Mais il est possible d'étudier mathématiquement l'état statique du marché à un instant donné, c'est-à-dire d'établir la loi de probabilité des variations de cours qu'admet à cet instant le marché. Si le marché, en effet, ne prévoit pas les mouvements, il les considère comme étant

Mouvement brownien des photons quittant le soleil



L'histoire des rayons cathodiques

Les acteurs principaux

William Crookes (GB)

Jean Perrin (F)

Philipp Lenard (D)

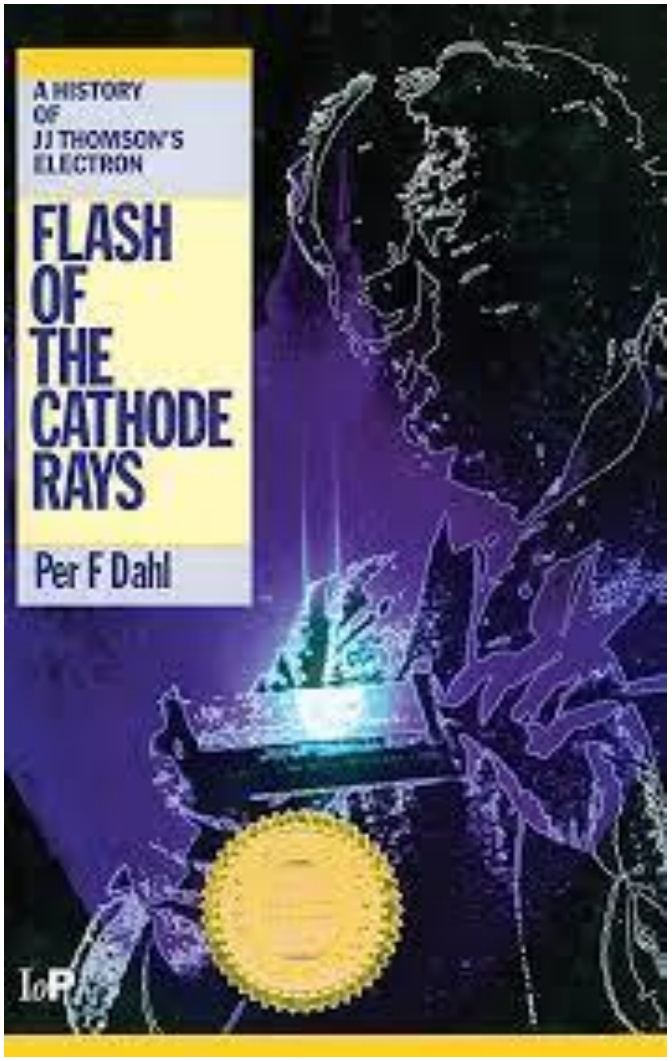
Joseph John Thomson (GB)

Heinrich Hertz (D)

Particule ?

Onde ?

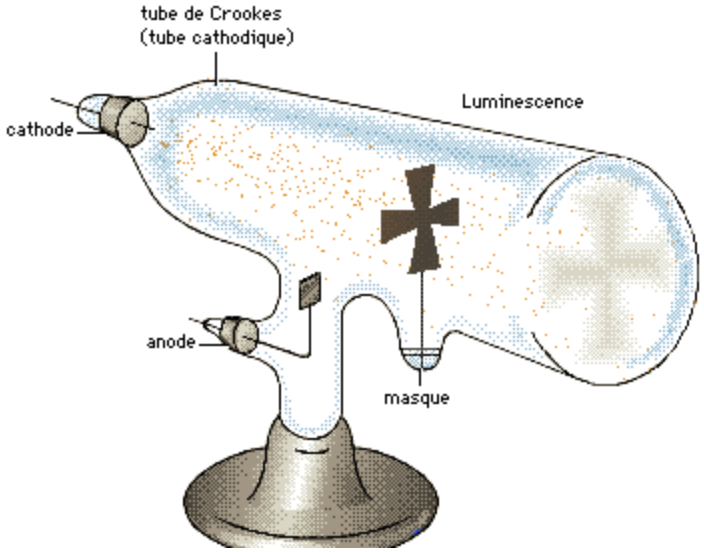
Per F. Dahl, *Flash of the Cathode Rays : A History of J.J. Thomson's Electron*

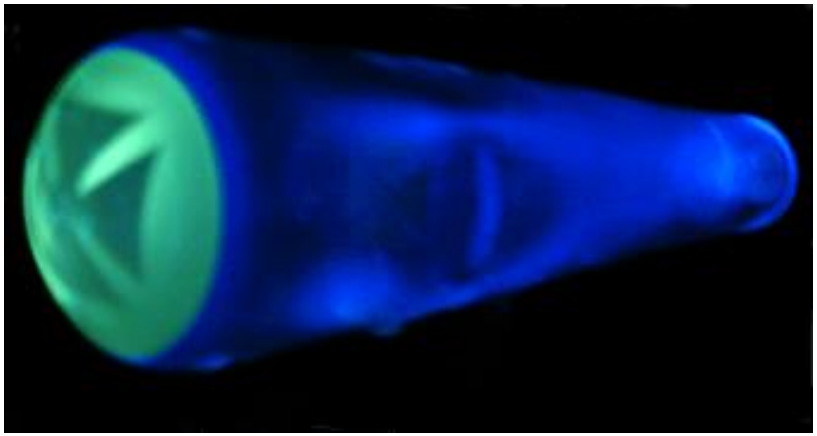


A la fin du XIX^{eme} siècle, à la suite des grandes découvertes dans les domaines de l'électricité, du magnétisme et de la thermodynamique, bien des physiciens pensaient que leur science parvenait à son terme. Il leur restait cependant un grand problème à résoudre: celui **de la nature des rayons cathodiques**. Et la découverte de l'électron résulte de l'intérêt soutenu que ces physiciens portèrent aux décharges d'électricité dans les tubes « à vide ».

William Crookes (1832-1919)

- ✓ Découverte des rayons cathodiques (1879)
- ✓ « radiant matter », rayons atomiques.





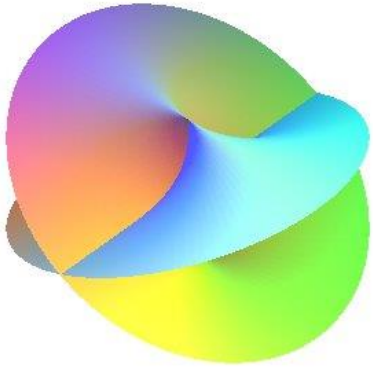
Le tube de Crookes

Les débuts I

✓ Dans une étude entreprise très tôt (**1833**) sur les décharges électriques dans les gaz, **Michael Faraday** trouva que "la raréfaction de l'air favorise le phénomène d'incandescence" *(Recherches expérimentales sur l'électricité)*. Il examina la luminescence dans des gaz différents sous basse pression, mais ne put jamais la résoudre. Il décrivit la beauté de cette incandescence et observa la zone obscure près de l'anode qui porte son nom maintenant. Le vide qu'il pouvait obtenir était encore plus médiocre qu'il ne pouvait en juger.

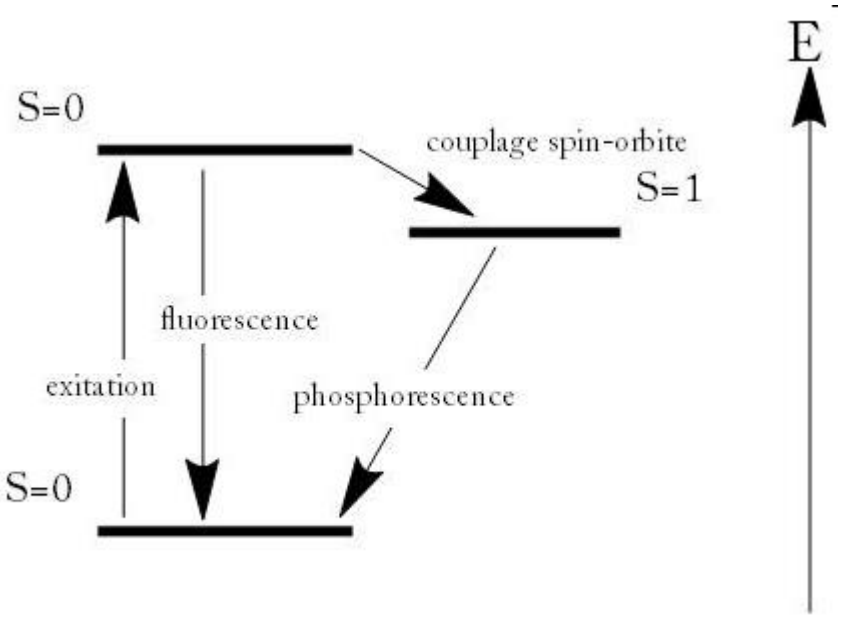
✓ En **1858**, **Julius Plücker** eut l'idée d'approcher un aimant du tube à vide pour voir ce qui arriverait à la décharge. Il remarqua une déviation (déflection) de la décharge. L'année suivante, il rapporta avoir vu une brillante phosphorescence verte dans le verre du tube près de la cathode, et il put changer la position des taches phosphorescentes en utilisant un aimant. Cependant il ne put aller plus loin, son vide étant par trop insuffisant.

LA CONOÏDE DE PLÜCKER

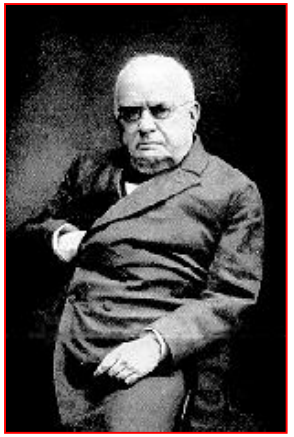


La **luminescence** est une émission de lumière dite « froide » par opposition à l'incandescence qui elle est dite « chaude » : toute lumière est produite par le retour vers un état de moindre énergie des électrons excités et on parle de luminescence quand le mode d'excitation n'est pas le chauffage.

Quand l'émission de lumière suit l'excitation, on parle de fluorescence ;
quand le délai est plus long, on parle de phosphorescence.

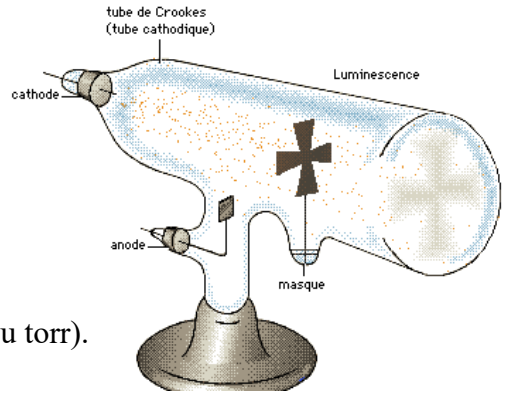


Les débuts II



✓ En **1869**, un élève de Plucker, **Johann Hittorf** (1824-1914), eut plus de succès. Entretemps, on s'était mis à utiliser les premières pompes à mercure et il pouvait vider ses tubes un peu mieux que ses prédécesseurs. Il vit l'ombre projetée par un objet placé devant la cathode, ce qui indiquait que la décharge provenait bien de celle-ci. Le terme de rayons cathodiques fut forgé en **1876** par **Goldstein.**

✓ En **1879**, **William Crookes** mena des études systématiques sur les rayons cathodiques dans des tubes qu'il vidait avec une pompe améliorée dont il était l'inventeur. Il est révélateur de lire dans l'un de ses articles qu'il était certain d'avoir obtenu un vide exceptionnellement bon: **la pression y était de 0.04 mm Hg** environ un million de fois plus élevée que celle que nous obtenons aujourd'hui.



1 atm= 1 013 hPa = 1.013 bar ≈ 760 mm Hg (millimètre de mercure ou torr).

Nous savons aujourd'hui que les rayons cathodiques sont des électrons qui se déplacent rapidement, mais personne alors ne connaissait même l'existence des électrons. Les faits connus, concernant ces rayons cathodiques, étaient **qu'ils sortaient de la cathode d'un tube à vide élevé, qu'ils heurtaient la paroi opposée du tube, la rendant lumineuse, qu'ils se déplaçaient apparemment en ligne droite, puisque des objets placés sur leur parcours projetaient des ombres nettes, et qu'ils étaient probablement déviés par un aimant, quoique personne ne put être affirmatif sur ce point.**

La controverse

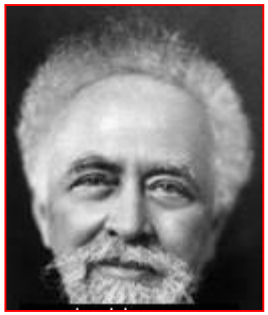
Une grande controverse s'éleva sur la nature des rayons cathodiques. Qu'étaient-ils ? Certains disaient qu'il s'agissait **de corpuscules**, de particules éjectées de la cathode, d'autres estimaient que c'était **des ondes**. Assez curieusement, les opinions se répartirent suivant des axes nationaux.

✓ En **1892**, **Hertz** fit état d'une expérience censée prouver que les rayons cathodiques ne pouvaient être des particules et devaient donc être des ondes. Il montra que ces rayons pouvaient traverser une fine paroi de métal sans y percer de trous. Il fit également passer un faisceau de rayons cathodiques entre deux plaques parallèles, l'une ayant une charge électrique positive et l'autre négative. Ce faisceau pouvait être observé grâce aux vives luminescences produites sur certaines parties de la paroi en verre. Ne détectant aucune déviation de ce faisceau, **Hertz** en conclut qu'il s'agissait bien d'ondes…(cf. **Thomson**)

Gustav Heinrich Wiedemann, **Goldstein** et tous les physiciens allemands acquiescèrent.

Mais en Angleterre, **Crookes** maintenait que ces rayons étaient des particules électriquement chargées, et les physiciens anglais (**Kelvin**, **Thomson**...) suivirent et soutinrent ces particules.

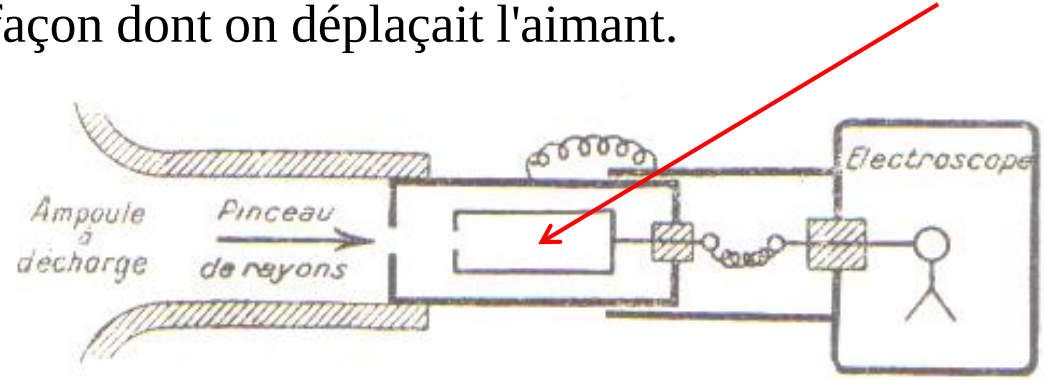
Aboutissement **1895**

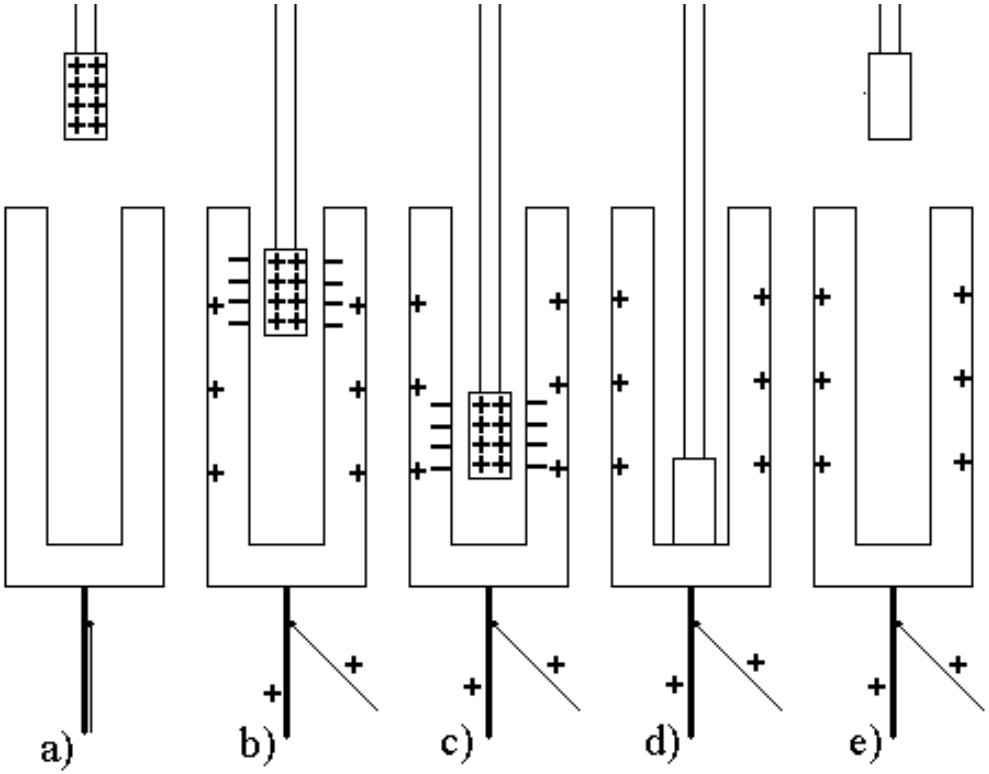


Jean Perrin (F)

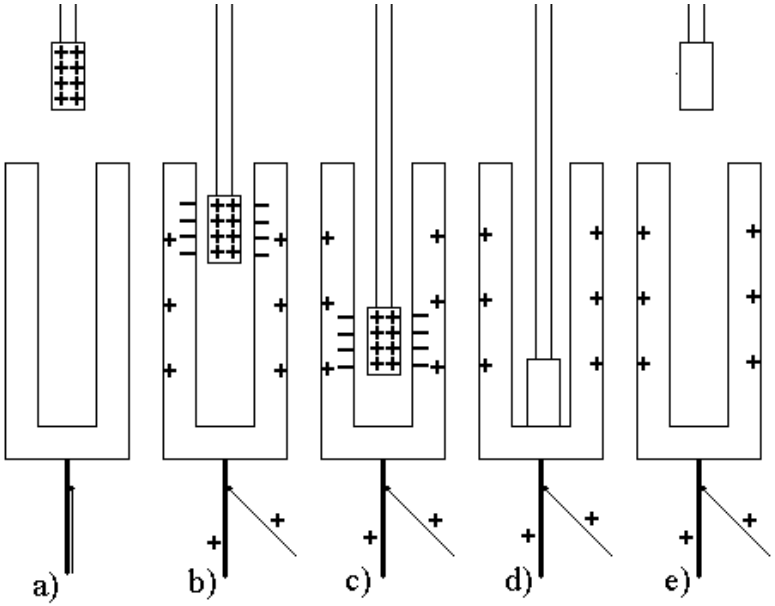
Finalement, en **1895**, c'est en France que **Jean Perrin** (1870-1942) prouva de façon convaincante que les rayons cathodiques étaient des particules négativement chargées.

Ayant produit des rayons cathodiques dans un tube à décharge soigneusement vidé, il les envoya dans une *cage de Faraday* et montra qu'ils portaient une **charge négative**. On pouvait les dévier avec un aimant et les envoyer dans *la cage de Faraday* ou en dehors, suivant la façon dont on déplaçait l'aimant.





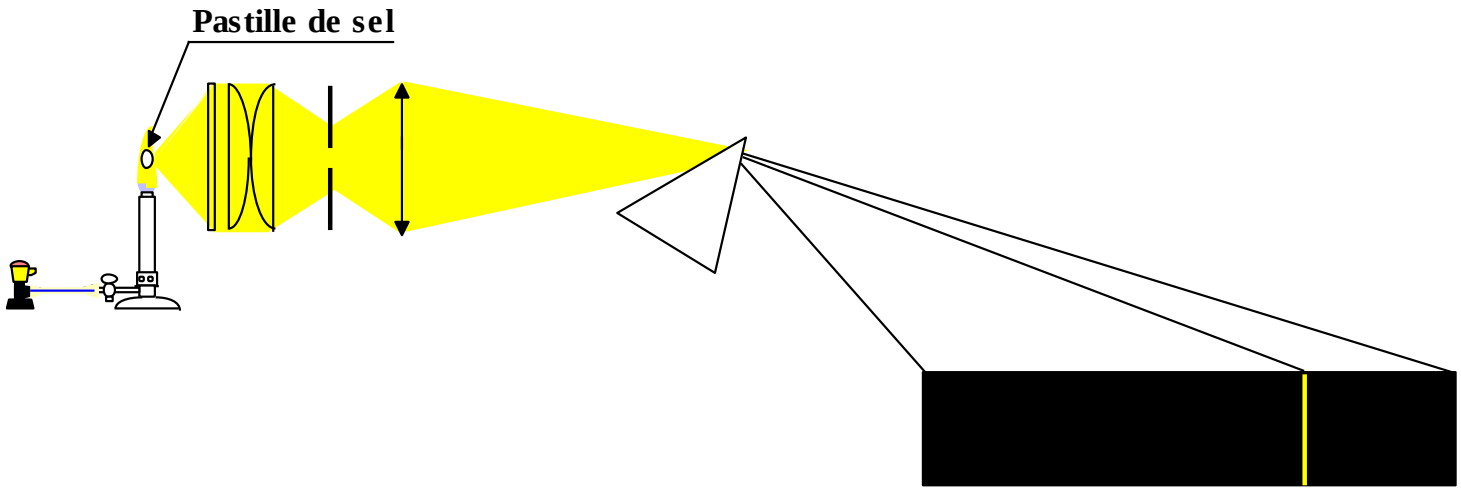
Exemple d'expérience réalisée avec un cylindre de Faraday.



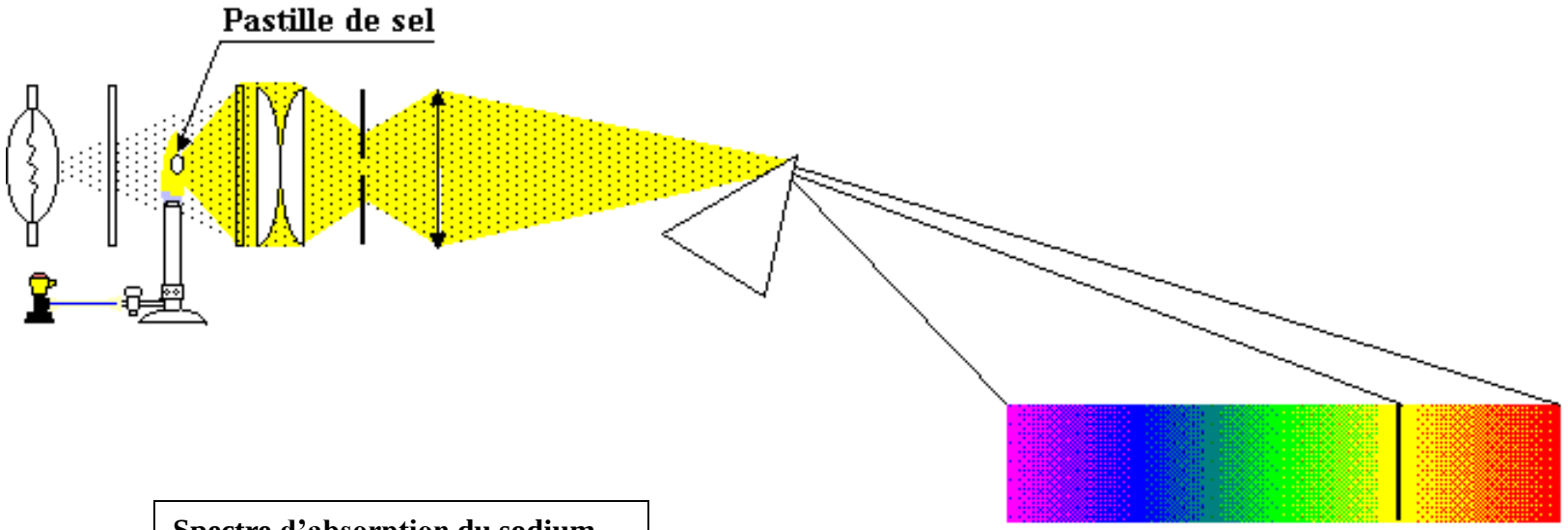
Lorsque, le cylindre étant initialement non chargé, on y introduit progressivement un corps chargé, l'électrisation du cylindre augmente progressivement au début mais le maximum est atteint dès que le corps est complètement dans le cylindre. Le mouvement du corps chargé dans le cylindre n'a alors plus aucune influence sur ce qui se passe à l'extérieur de ce dernier. De même, si le corps touche la paroi extérieure du cylindre, on n'observe rien extérieurement. Si on retire alors le corps du cylindre, l'électrisation de celui-ci reste inchangée alors que l'on peut vérifier que le corps est complètement déchargé.

De façon générale, ce qui se passe à l'intérieur du cylindre de Faraday n'a pas d'influence électrique sur l'extérieur. Cette propriété se généralise d'ailleurs à une enceinte métallique de forme quelconque (cage de Faraday). La réciproque est vraie: les phénomènes électriques qui se déroulent à l'extérieur d'une cage de Faraday n'ont pas d'influence sur l'espace situé à l'intérieur de celle-ci.

Première détermination du rapport e/m



Spectre d'émission du sodium



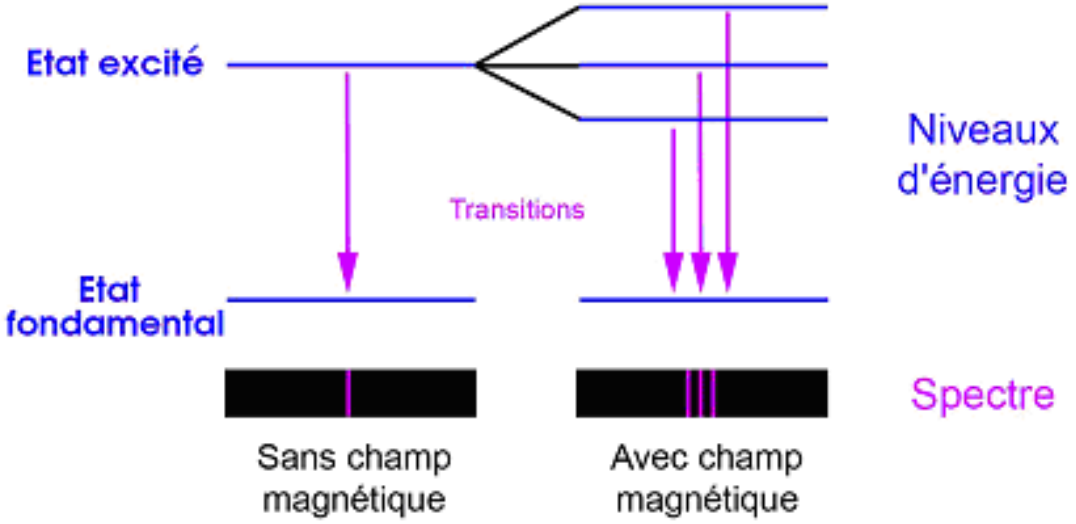
Spectre d'absorption du sodium

✓ Quand on chauffe dans une flamme un gaz constitué d'un seul type d'atome (comme le sodium ou le zinc), ce dernier émet une lumière très différente, qui résulte de la superposition de quelques longueurs d'onde seulement. Dans la pratique, le spectre de cette lumière, obtenu à travers un prisme, se réduit à quelques raies très étroites de couleur bien déterminée.

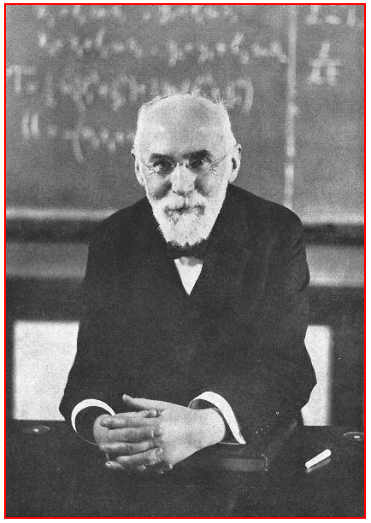
✓ De **1896** à **1897**, **Zeeman** s'intéresse à ces « spectres d'émission » et en particulier à la manière dont ils sont affectés par un champ magnétique.

✓ En plaçant la flamme de sodium au centre d'un aimant, **Zeeman** observe que le spectre change d'aspect: là où n'existait qu'une seule raie, on en voit maintenant trois, régulièrement et finement espacées ! Un espacement si fin que les prédécesseurs de **Zeeman** sont tous passés à côté de cette découverte... Il faut toute l'ingéniosité du Hollandais pour concevoir un dispositif capable de mesurer précisément le phénomène.

Pieter Zeeman



Lorentz et Zeeman reçoivent le prix Nobel de Physique en 1902



Hendrik Antoon Lorentz (1853-1928)

Mouvement harmonique de la charge dans l'atome perturbé par la **force de Lorentz**

$$\vec{F} = e\vec{v} \times \vec{B}$$

✓ **Zeeman** et **Lorentz** purent déterminer le rapport e/m ainsi que le signe de la charge.

✓ Dans l'expérience de **Zeeman**, le mouvement harmonique de la charge dans l'atome est perturbé par la force de Lorentz et, si celle-ci est suffisamment petite par rapport à la force de rappel de l'oscillateur, son effet dans le plan perpendiculaire au champ magnétique est de déplacer la fréquence de + ou - ν = (e/2m)*B, d'où la mesure de (e/m) à partir de l'élargissement des raies.

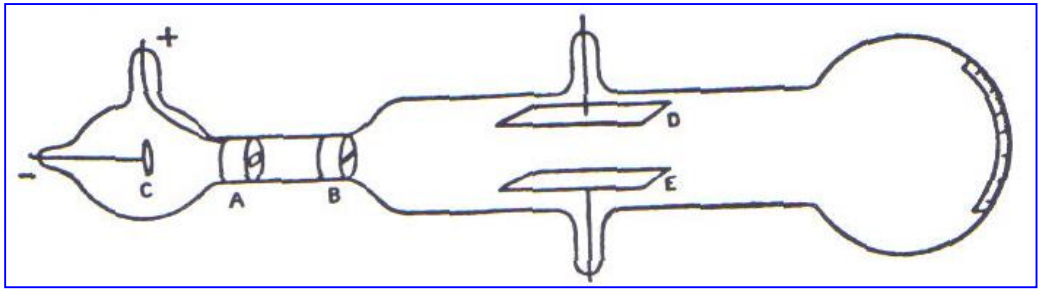
✓ Le résultat le plus remarquable obtenu par **Zeeman** résidait dans le signe négatif et la valeur de e/m, qui était environ mille fois supérieure à ce qu'on attendait pour l'atome entier, sur la base des notions sommaires que les scientifiques possédaient alors des masses atomiques.

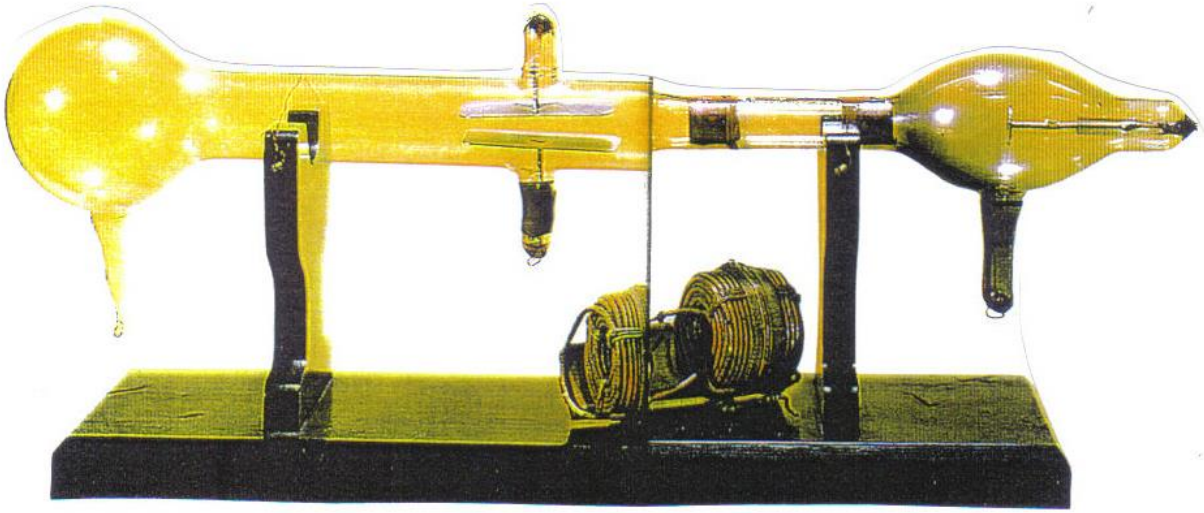
La découverte de l'électron (1897)

✓ **Thomson** reçut en 1906 le prix Nobel de physique pour son travail sur la conduction de l'électricité par les gaz.

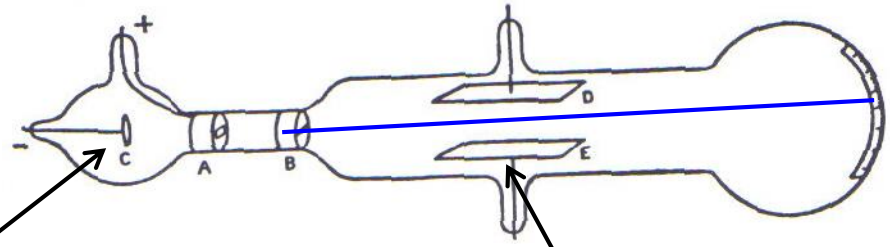
✓ Il est à l'origine de la découverte de l'électron par ses expérimentations sur les flux de particules (électrons) créés par des rayons cathodiques.

✓ Théoricien et expérimentateur, Thomson avança en 1898 la théorie du « *pain aux raisins* » sur la structure atomique, dans laquelle les électrons sont considérés comme des « raisins » négatifs enfoncés dans un « pain » de matière positive.





Quand **Thomson** reliait les deux plaques métalliques E et D aux bornes d'une batterie de pile, la tache phosphorescente se déplaçait, montrant que les rayons cathodiques étaient déviés par un champ électrique.



cathode

Thomson est le premier à avoir observé la déviation électrique des rayons cathodiques

Pourquoi n'y avait-t-il eu personne pour observer cette déviation électrique au cours des dizaines d'années durant lesquelles on avait étudié les rayons cathodiques ?

La raison en est simple:
à moins que le vide ne soit bon dans le tube cathodique, on ne peut y établir de champ électrique.
En effet, un **mauvais vide** est conducteur et on ne peut y maintenir un champ électrique statique.
Mais **Thomson** y parvint.

Dans son article de **1897**, **Thomson** faisait une autre observation remarquable. Les corpuscules constituant les rayons cathodiques étaient les mêmes, quelle que fût la composition de la cathode ou de l'anticathode ou du gaz dans le tube.

Il s'agissait là d'un constituant de toute matière.

✓ La quantité totale d'électricité **Q** portée par un courant donné est égale au nombre **N** de particules ou de corpuscules dans ce courant multiplié par la charge **e** de chacun d'eux:

$$Q = Ne$$

✓II mesurait ensuite l'énergie **W** transportée par les particules, en mesurant la chaleur qu'elles généraient; cette énergie devrait être égale à l'énergie cinétique de particules de masse **m** et de vitesse **v**:

$$W = 1/2\ (Nmv^2)$$

✓Ayant dévié magnétiquement le faisceau de particules, il savait que:

$$(mv)/e = BR$$

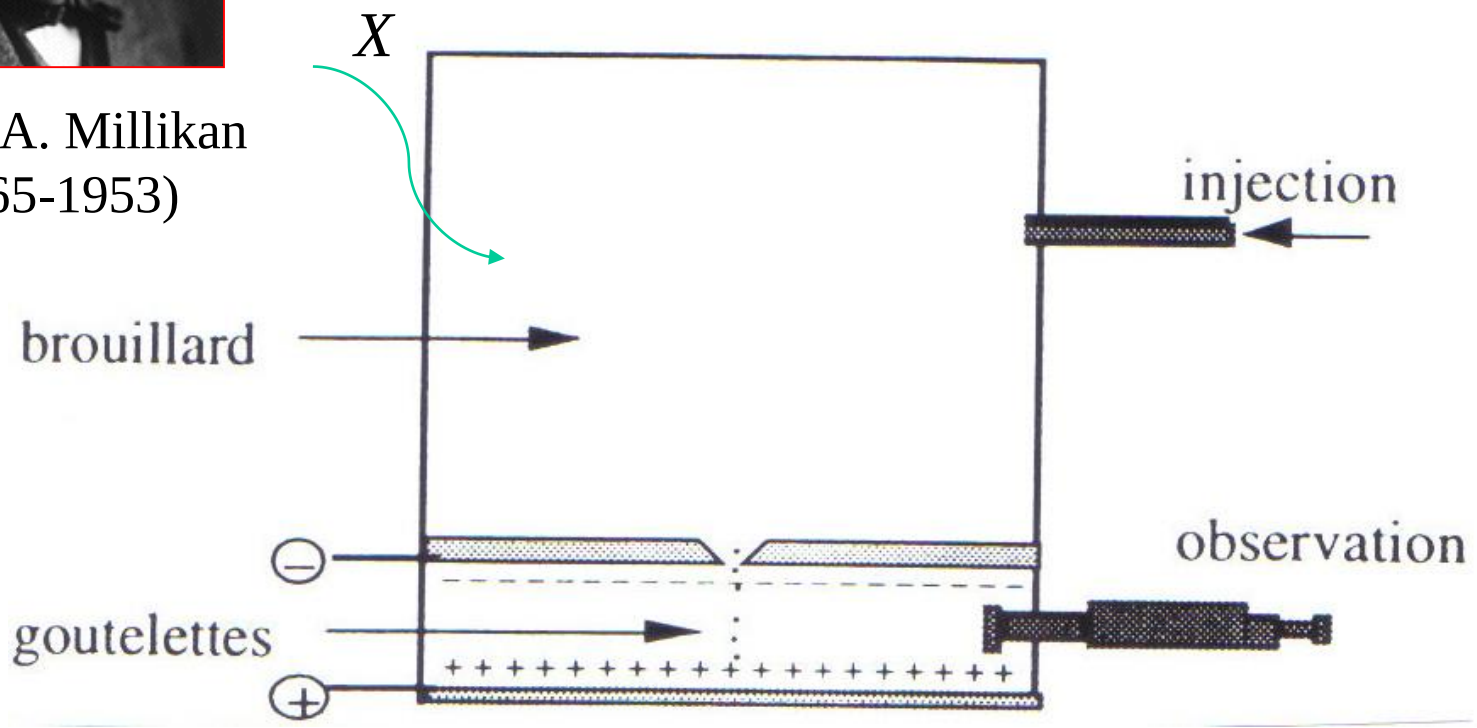
où **R** est le rayon de courbure de la trajectoire, et **B** le champ magnétique. Comme l'énergie, la quantité d'électricité, le champ magnétique et le rayon de courbure étaient mesurables, il pouvait conclure que:

$$e/m = 2W/QB^2R^2$$

Expérience de Millikan (1911)

Robert A. Millikan
(1865-1953)

Mesure de la charge de l'électron



✓ Dans l'enceinte supérieure de l'appareil, un brouillard d'huile minérale est pulvérisé; celui-ci tombe très lentement et pénètre dans le compartiment inférieur par le trou central.

✓ Ces gouttelettes de brouillard sont alors soumises à un rayonnement X, durant un temps très bref. Les photons X arrachent des électrons à certains atomes et les ions se fixent sur les gouttes.

✓ Les faces horizontales de l'enceinte inférieure sont formées de plaques métalliques et une différence de potentiel élevée est appliquée entre ces plaques. Elles se comportent donc comme un condensateur et un champ électrique intense, orienté verticalement, engendre une force agissant sur les gouttelettes chargées. Celles-ci tombent sous l'action de la pesanteur mais elles sont freinées dans leur descente par la force électrique ascendante, pour une direction convenable du champ.

✓ De plus, le bilan des forces agissantes doit prendre en compte la poussée d'Archimède provenant du gaz situé dans l'enceinte ainsi que de la résistance à l'avancement due à la viscosité de ce gaz.

✓ Après un certain temps, les gouttelettes acquièrent **une vitesse limite** qu'on peut déterminer expérimentalement; on en déduit la valeur **de la charge** des gouttelettes.

✓ Comme le nombre d'ions fixés sur chaque gouttelette est variable, on obtient des valeurs différentes de charges. Cependant, **on constate que toutes ces charges admettent un plus grand commun diviseur identique**: il s'agit de la valeur de la charge de l'électron égale à **$1.6\ 10^{-19}$ Coulombs**. Cette mesure permit de trouver également sa masse (puisque le rapport **e/m** était connu depuis Thomson). La masse se révéla être de **$9.11\ 10^{-28}$ grammes**.

L'ÉLECTRON

PAR

Robert-Andrews MILLIKAN

Professeur de Physique honoraire à l'Université de Chicago,
Directeur du Laboratoire de Physique Norman Bridge,
Institut de Technologie de Californie,
Pasadena (Californie).

TRADUIT SUR LA SECONDE ÉDITION AMÉRICAINE

PAR

Adolphe LEPAPE

Chef des Travaux de Recherches physico-chimiques
à l'Institut d'Hydrologie et de Climatologie de Paris
(Collège de France).

Avec 42 figures.

PARIS

LIBRAIRIE FÉLIX ALCAN

108, BOULEVARD SAINT-GERMAIN, 108

1926

GARNIR HENRY
Rue Ferrer, 2, Jemeppe s/m

Soit $v_0 = v_{\text{lim}}(0)$ la vitesse en champ nul. On peut alors réécrire: $v_{\text{lim}}(E) = v_0 - \frac{qE}{6\pi\eta r}$.

Méthode de l'équilibre

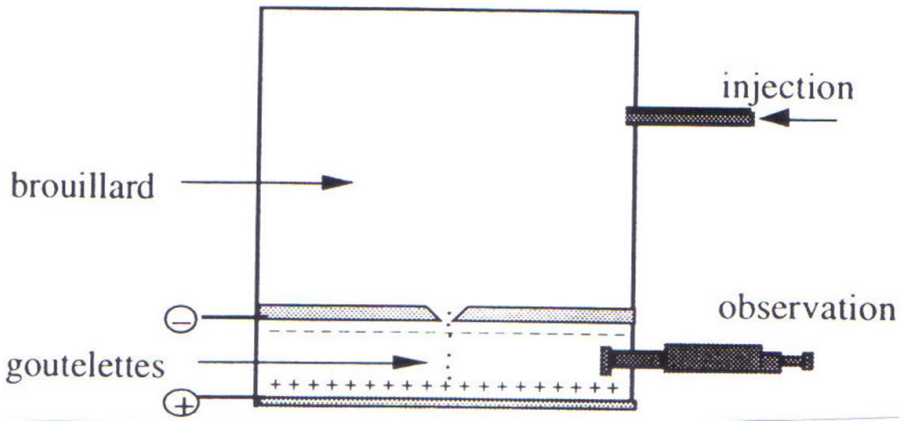
Dans cette méthode, la mesure se fait en deux étapes.

On annule la tension aux bornes du condensateur. Le champ électrique E est alors nul, et on mesure la vitesse limite v_0 de la goutte. Cette vitesse permet de remonter au rayon inconnu de la goutte:

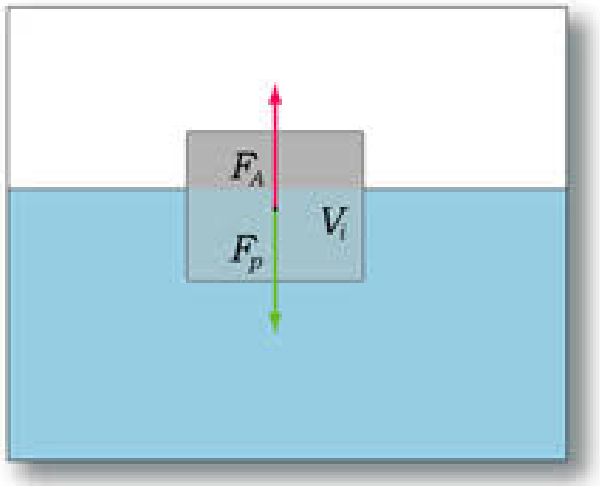
$$v_0 = \frac{\frac{4}{3}\pi r^3 g(\rho_h - \rho_a)}{6\pi\eta r} \quad \Rightarrow \quad r = 3\sqrt{\frac{\eta v_0}{2g(\rho_h - \rho_a)}}.$$ *mesurable avec une lunette de visée et un chronomètre*

On fait varier le champ électrique jusqu'à ce que la goutte soit immobilisée. Le champ E_0 correspondant à l'équilibre des forces permet de remonter à la charge de la goutte:

$$v_{\text{lim}}(E_0) = 0 \quad \Rightarrow \quad q = \frac{6\pi\eta r v_0}{E_0}.$$



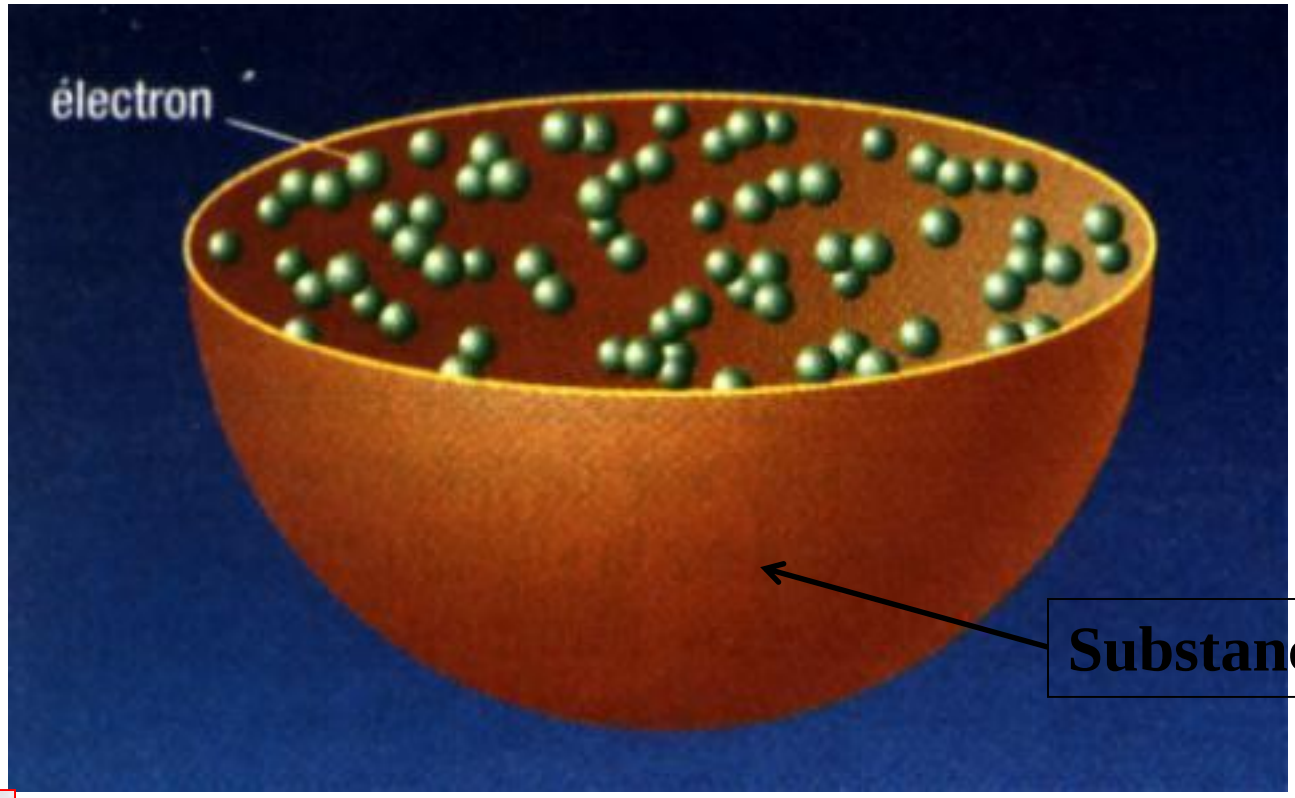
« Tout corps plongé dans un fluide au repos, entièrement mouillé par celui-ci ou traversant sa surface libre, subit une force verticale, dirigée de bas en haut et opposée au poids du volume de fluide déplacé. Cette force est appelée poussée d'Archimède. Elle s'applique au centre de masse du fluide déplacé, appelé centre de poussée. »

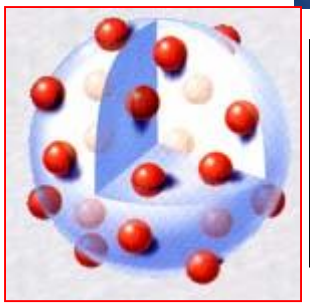


$$F = \rho l \cdot Vd \cdot g$$

- F : Poussée d'Archimède
- ρl : masse volumique
- Vd : volume déplacé
- g : accélération de la pesanteur

Modèle de Thomson (1904)





En 1904, il propose un premier modèle d'atome, surnommé depuis « *le pudding de Thomson* ». Il imagine l'atome comme une sphère remplie d'une substance électriquement positive et fourrée d'électrons négatifs « comme des raisins dans un cake » .

Mouvement vibratoire des électrons à l'intérieur des atomes (**Lorentz**)

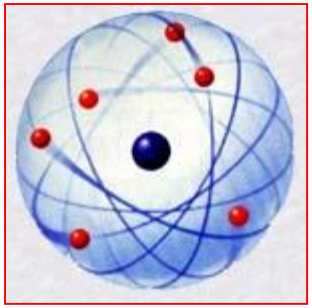
Un pudding c'est trop mou …

Ernest Rutherford (1871-1937)

Preuve expérimentale de l'existence du noyau … (1911)

Rutherford, Ernest, lord (1871-1937), physicien britannique, il fut lauréat du prix Nobel pour ses travaux en physique nucléaire et pour sa théorie relative à la structure de l'atome.

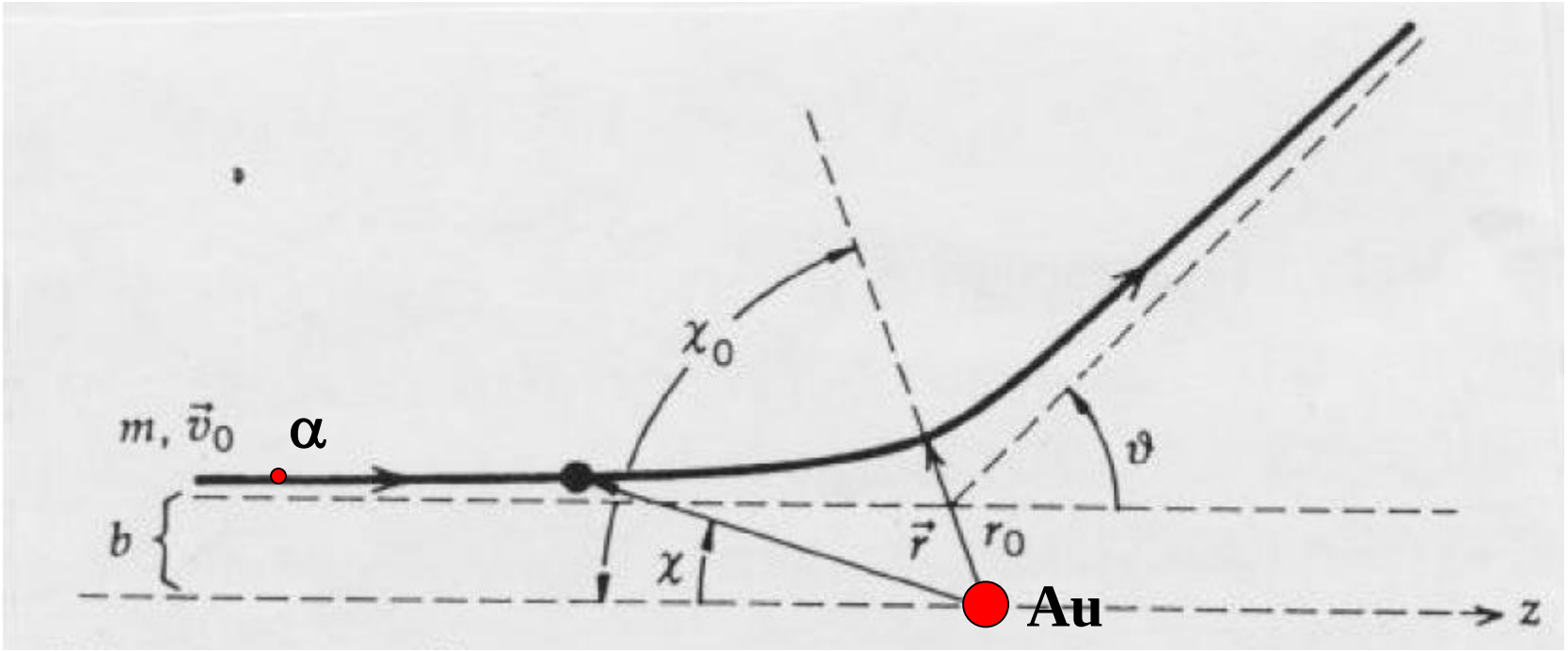
Rutherford naquit en août 1871 à Nelson, en Nouvelle-Zélande, et fit ses études à l'université de Nouvelle-Zélande, puis à celle de Cambridge. Il enseigna la physique à l'université McGill de Montréal, au Québec, de 1898 à 1907, et à l'université de Manchester, en Angleterre, pendant les douze années qui suivirent. À partir de 1919, il fut professeur de physique expérimentale et directeur du laboratoire Cavendish, à l'université de Cambridge. Il occupa également une chaire de professeur, à partir de 1920, à l'Institution royale de Grande-Bretagne, à Londres.



Rutherford fut l'un des premiers et des plus importants chercheurs dans le domaine de la physique nucléaire. Peu de temps après la découverte de la radioactivité, en 1896, par le physicien français Henri Becquerel, **Rutherford** identifia les trois composants principaux du rayonnement, qu'il baptisa respectivement rayonnements **alpha, bêta** et **gamma**. Il montra également que les particules alpha étaient en fait des noyaux d'hélium. Son étude du rayonnement le conduisit à élaborer une théorie de la structure atomique. Il fut ainsi le premier à décrire l'atome comme un noyau dense autour duquel gravitent des électrons.

En 1919, **Rutherford** fit une expérience importante en physique nucléaire : en bombardant de l'azote gazeux avec des rayons alpha du radium, il obtint la formation d'atomes d'un isotope de l'oxygène et de protons. Cette transformation de l'azote en oxygène fut la **première transmutation artificielle**. Ce résultat suscita le démarrage de recherches intensives sur d'autres transformations nucléaires et sur la nature et les propriétés du rayonnement. **Rutherford** et le physicien anglais Frederick Soddy proposèrent une explication de la radioactivité toujours en vigueur aujourd'hui.

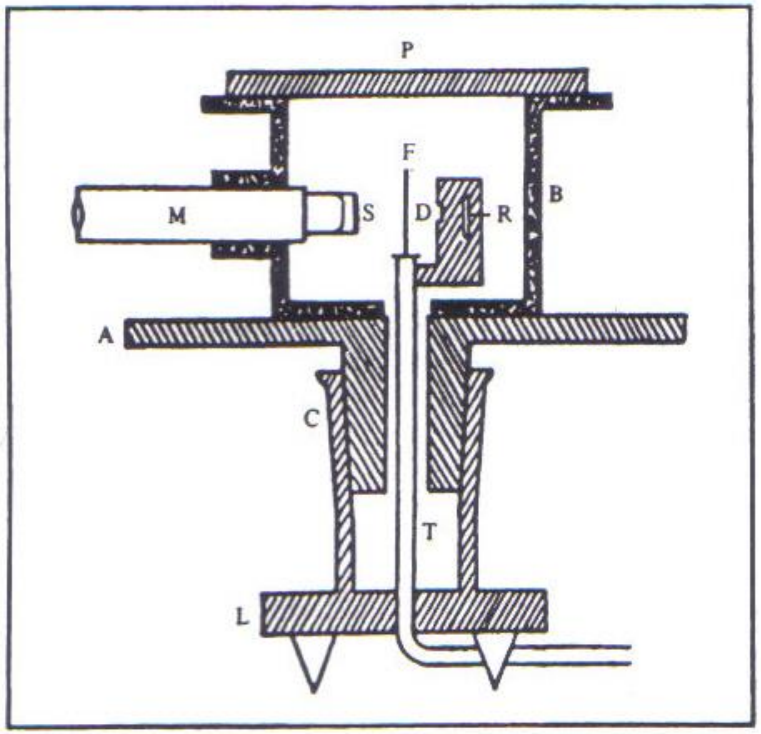
En 1903, **Rutherford** fut élu membre de la Royal Society de Londres, dont il assura la présidence de 1925 à 1930. C'est en **1908 qu'il reçut le prix Nobel de chimie**. Il fut nommé à l'ordre des chevaliers en 1914, et baron en 1931. Il mourut à Londres en octobre 1937, et fut enterré à l'abbaye de Westminster. Parmi ses ouvrages, il faut citer Radioactivité (1904) et Rayonnement de substances radioactives (1930), qu'il écrivit avec les physiciens Sir James Chadwick et Charles Drummond Ellis, et qui sont devenus des classiques en la matière, mais aussi La Nouvelle Alchimie (1937).



Sous la direction de Rutherford, Geiger et Marsden ont effectué l'expérience historique qui a démontré que les charges positives de l'atome se trouvent dans un noyau très petit par rapport à la dimension de l'atome.

Il s'agit de l'étude de la diffusion de particules α monocinétiques, émises par une source radioactive de ^{210}Po, par des noyaux lourds de Au (Z=79).

1911



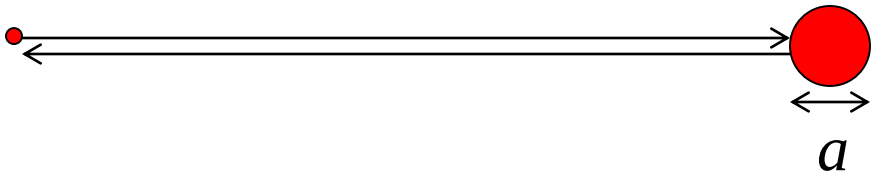
Le dispositif utilisé pour l'expérience de Rutherford. Des particules alpha provenant de la source (R) traversent une feuille de métal (F) et provoquent les scintillations sur un écran fluorescent (S). Ces scintillations sont observées avec un microscope (M) qui peut effectuer une rotation autour de TF (extrait de Philosophical Magazine, *25, 604 (1913)).*

E (α) = 5.4 MeV
Z = 79 (Au)
Z' = 2 (particule α)

$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{ZZ'e^2}{4\pi\epsilon_0 a}$$

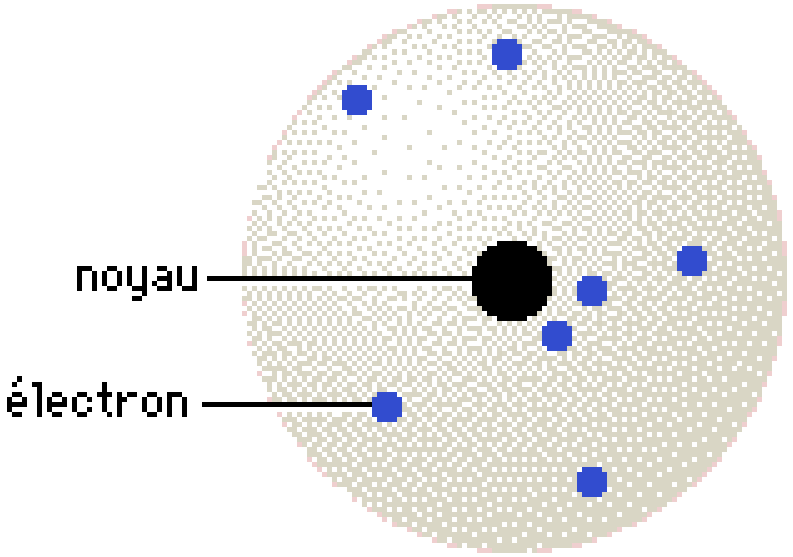
^{210}Po

$a \sim 4.21\ 10^{-14}$ m << 10^{-10} m



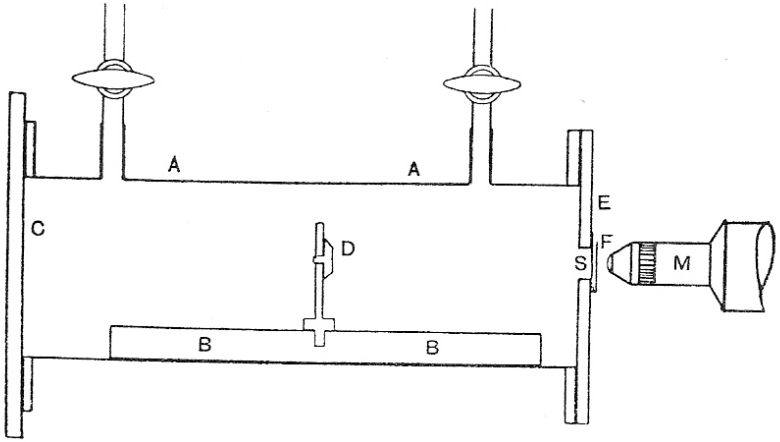
Rutherford a en plus calculé la probabilité de diffusion à un angle ***θ***, selon son modèle d'atome avec un noyau, et a obtenu la dépendance très connue de **$\sin^{-4}(\theta / 2)$**. Dans la théorie moderne de la diffusion, on utilise plutôt la section efficace que la probabilité.

Le modèle de Rutherford représente l'atome comme un système solaire miniature: les électrons gravitent autour du noyau comme les planètes autour du Soleil.



Ernest Rutherford : la transformation radioactive, Pierre Radvanyi
https://doi.org/10.4000/bibnum.837

La première réaction nucléaire: 1919



Observation de la première réaction nucléaire. Une source de radium est placée en D, un écran scintillant au sulfure de zinc en F, la chambre est fermée par une mince feuille d'argent S.

Rutherford, *Phil. Mag*. 1919, vol. 37, p. 581 et Rutherford, Chadwick & Ellis, *Radiations from Radioactive substances*, Cambridge University Press, 1930.

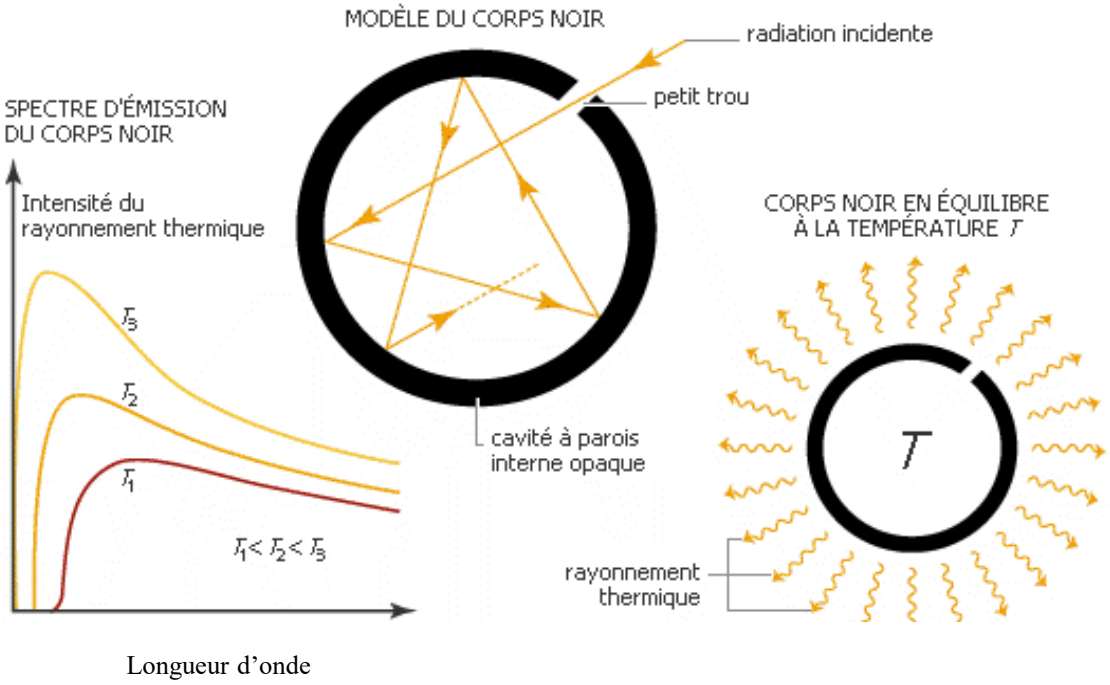
En 1919, encore à Manchester, Rutherford fait une expérience toute simple qui ouvrira une voie nouvelle à la science de la radioactivité. Dans une petite chambre (une boîte parallélépipédique), fermée par un écran scintillant, il place une forte source radioactive émettrice de rayons alpha énergiques. Il remplit la chambre d'azote. Lorsque la source est suffisamment éloignée de l'écran, les alpha ne peuvent plus l'atteindre, et pourtant Rutherford continue à observer des impacts provoquant des scintillations. Ce phénomène ne se produit pas lorsque la chambre est remplie d'oxygène ou de gaz carbonique. Il constate qu'il s'agit de protons (noyaux d'hydrogène) et conclut que quelques particules alpha ont désintégré des noyaux d'azote.

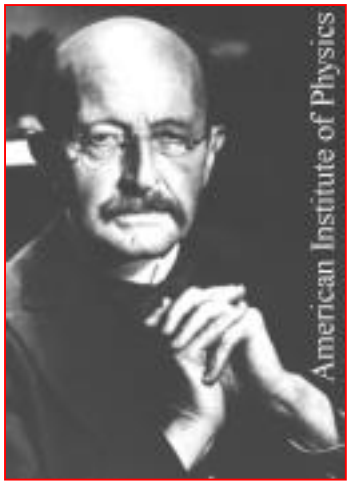
C'est la première **transmutation** provoquée, *la première réaction nucléaire*, le début de la **physique nucléaire**. En 1924, son collaborateur Patrick M. S. Blackett (1897-1974), prix Nobel de physique 1948, montrera, sur des clichés de chambre à brouillard, que la réaction sur l'azote produit de l'oxygène.

azote 14 + alpha → oxygène 17 + proton.

$^{14}N + {}^{4}He \rightarrow {}^{17}O + p^{+}$

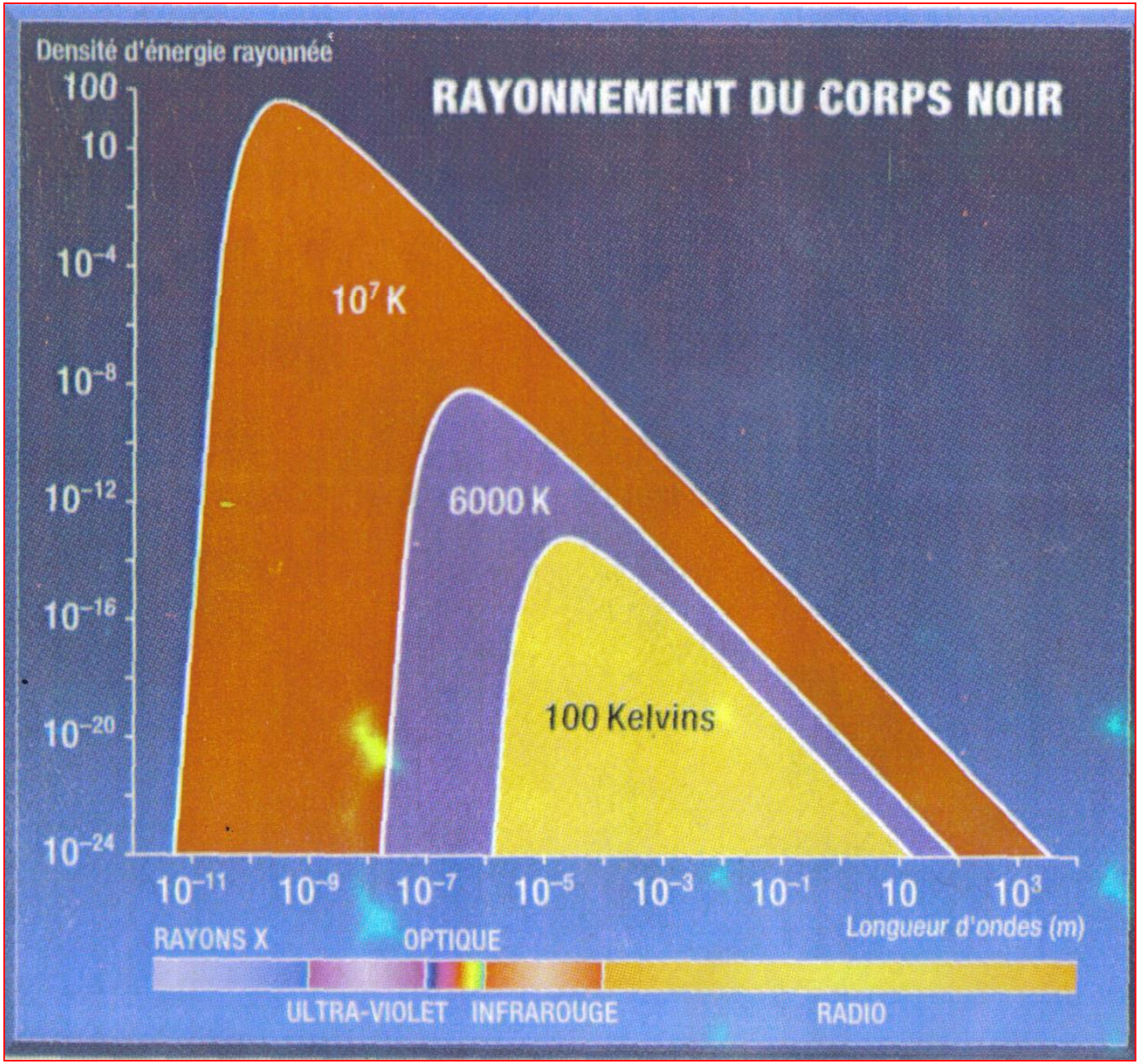
Le corps noir (1900)





Max Planck
(1900)

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


Densité d'énergie rayonnée
RAYONNEMENT DU CORPS NOIR
100
10
10^{-4}
10^{-8}
10^{-12}
10^{-16}
10^{-20}
10^{-24}
10^{7} K
6000 K
100 Kelvins
10^{-11}
10^{-9}
10^{-7}
10^{-5}
10^{-3}
10^{-1}
10
10^{3}
Longueur d'ondes (m)
RAYONS X
OPTIQUE
ULTRA-VIOLET
INFRAROUGE
RADIO

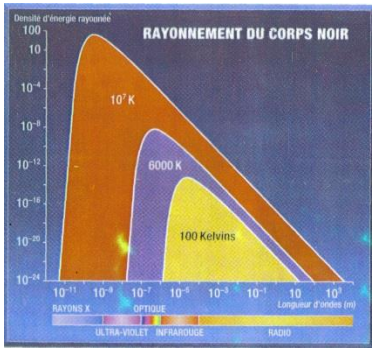
Acteurs et dates importantes du corps noir

✓ 1860 – Kirchhoff, dépend que de T → *loi universelle*

✓ 1879 – Stefan

$$E(T) = \int_0^\infty E_\lambda(\lambda, T) d\lambda = aT^4$$

✓ 1884 – Boltzmann



✓ Loi du déplacement de Wien (1894)

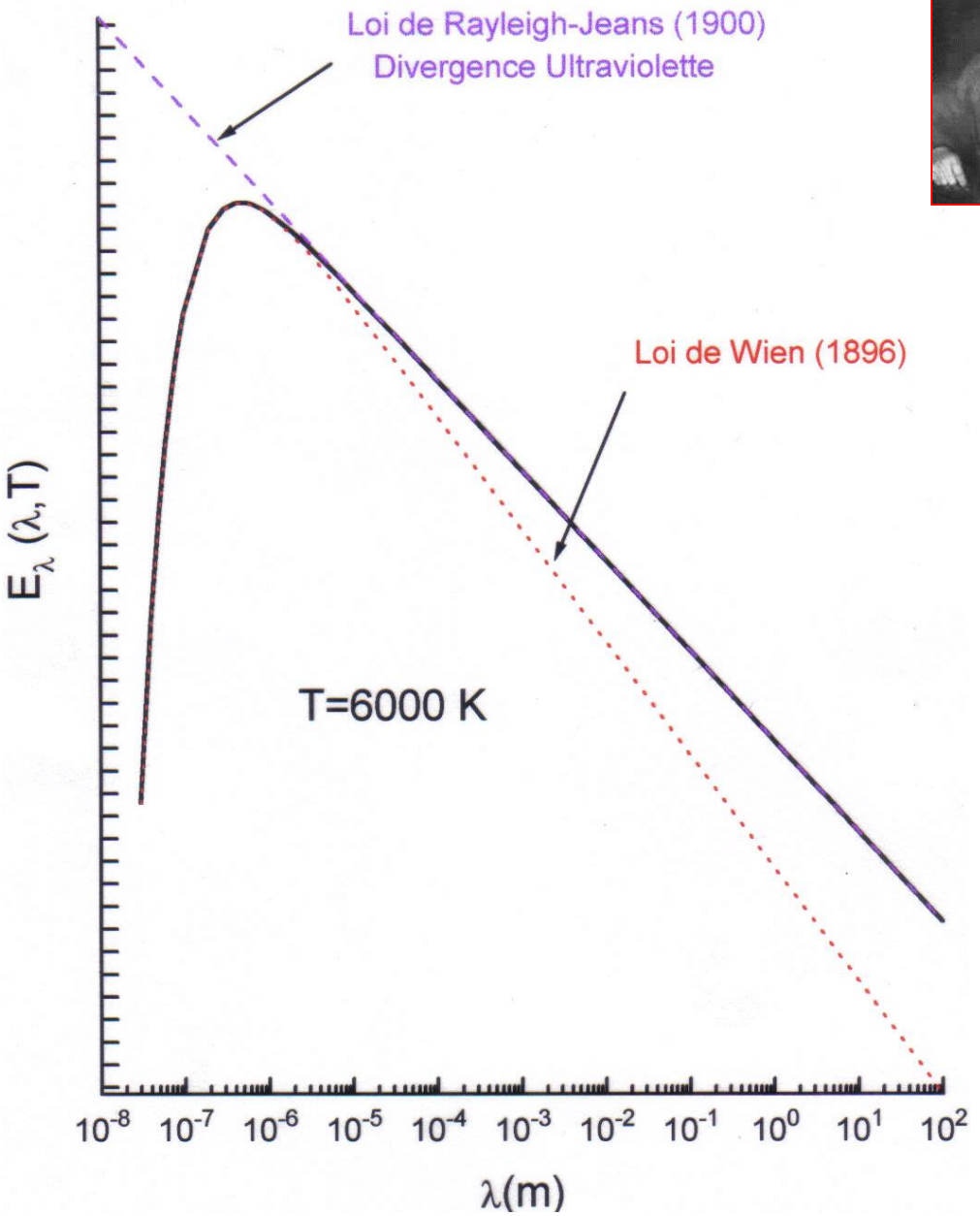
$$E_\lambda(\lambda, T) = T^5 f(\lambda T)$$

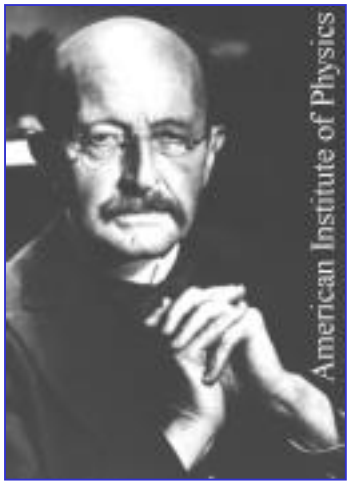
✓ Loi de l'équipartition de Rayleigh-Jeans (1900)

La catastrophe Ultraviolette

Jeans

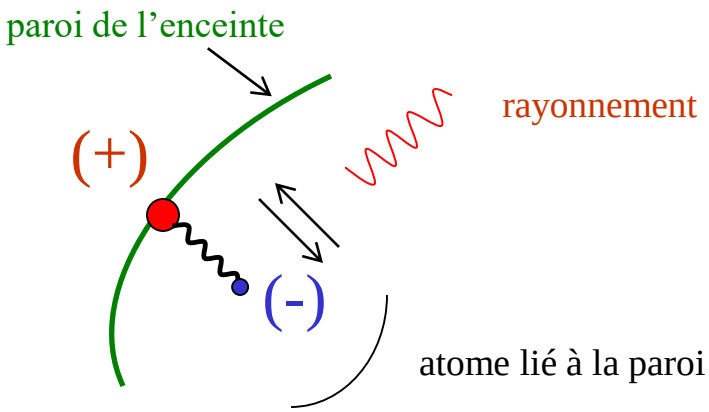
Report on Radiation and the Quantum Theory (1914)





Max Planck
(1900)

Les résonateurs de Planck



L'<u>échange d'énergie</u> entre un résonateur et le rayonnement se fait de **manière discontinue** → quantum d'énergie

$$\hbar\omega$$

En **1901**, **Planck** démontre que l'hypothèse des quanta d'énergie est **suffisante** pour expliquer les phénomènes observés.

$$\Rightarrow \quad E_\lambda(\lambda, T) = \frac{8\pi c h}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{ch}{k_B T \lambda}} - 1}$$

h => quanta $h = 2\pi\hbar$

c => Electromagnetisme

k_B => Thermodynamique

} trois constantes universelles.

h et k_B sont obtenus à partir de l'expérience

Congrès Solvay 1911

Théorie du rayonnement et quanta

En **1912**, **Henri Poincaré** démontre que l'hypothèse des quanta est **nécessaire et suffisante** pour expliquer les phénomènes observés

JOURNAL
DE PHYSIQUE
THÉORIQUE ET APPLIQUÉE.

SUR LA THÉORIE DES QUANTA;

Par M. H. POINCARÉ.

§ 1. — Introduction.

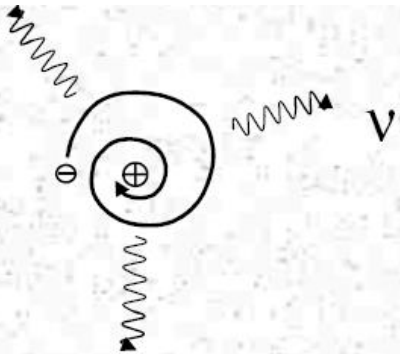
On sait à quelle hypothèse M. Planck a été conduit par ses recherches sur les lois du rayonnement. D'après lui, l'énergie des radiateurs lumineux varierait d'une manière discontinue, et c'est ce qu'on appelle la théorie des Quanta. Il est à peine nécessaire de faire remarquer combien cette conception s'écarte de tout ce qu'on avait imaginé jusqu'ici ; les phénomènes physiques cesseraient d'obéir à des lois exprimables par des équations différentielles, et ce serait là, sans aucun doute, la plus grande révolution et la plus profonde que la philosophie naturelle ait subie depuis Newton. Je ne parlerai pas des difficultés de détail, elles sautent à tous les yeux et M. Planck est le premier à s'en préoccuper.

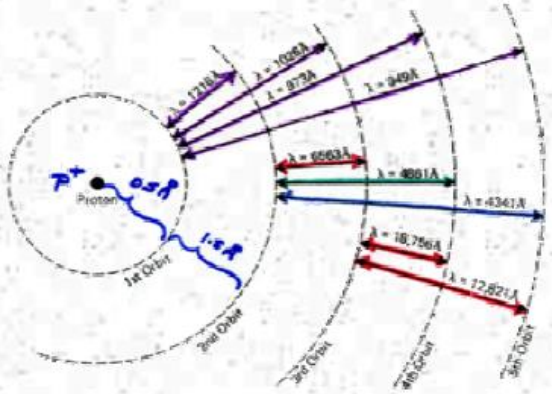
Peut-on néanmoins échapper à cette conséquence ? Bien des personnes l'ont pensé ; lors du récent Congrès de Bruxelles, M. Nernst m'avait communiqué certaines suggestions ; il pensait qu'on pourrait rendre compte des faits, en supposant que les masses, au lieu d'être constantes comme dans la mécanique classique, au lieu de dépendre seulement de la vitesse, comme dans la mécanique nouvelle fondée sur le principe de relativité, soient dépendantes à la fois des composantes de la vitesse et de celles de l'accélération. Ce sont ces suggestions de M. Nernst qui m'ont déterminé à entreprendre ce travail, et je dois dire tout de suite que j'ai été conduit à répondre négativement à la question posée par l'éminent physicien.

M. Planck se représente le rayonnement des solides comme dû à un très grand nombre de résonnateurs hertziens. Chacun de ces réson-

- Toute particule accélérée rayonne

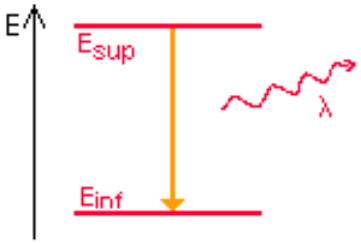
Problème de la stabilité des atomes !

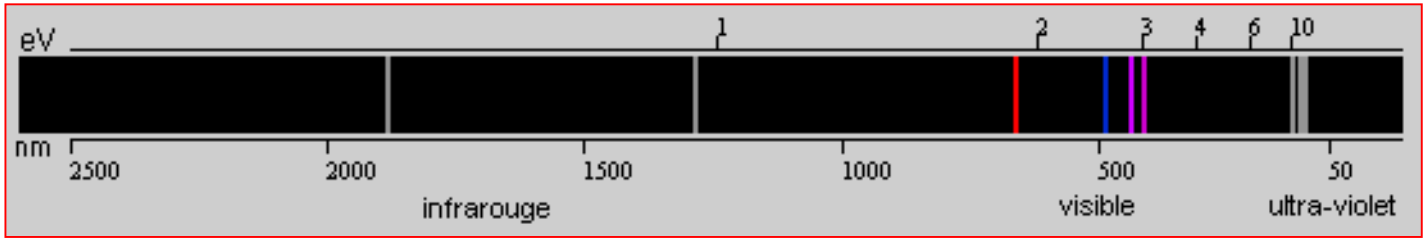




- Caractère discret des spectres atomiques

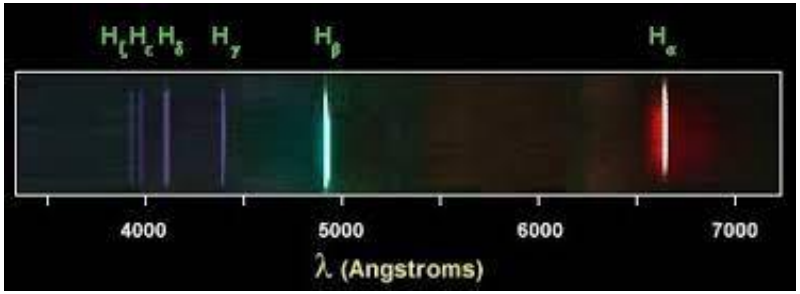
Quantification de l'action → principe de moindre action





Série de Balmer

En **1862**, le physicien suédois Anders Jonas Ångström avait identifié quatre raies de l'atome d'Hydrogène parmi les raies de Fraunhofer du spectre solaire. En 1868, il avait publié des mesures très précises de leurs longueurs d'onde avec une unité égale à 10^{-10} m que les spectroscopistes et les astronomes ont ensuite appelée l'Ångström et noté Å :



Raies de Fraunhofer	Raies de l'Hydrogène	Longueurs d'onde (Å)
C	$H\alpha$	6562,10
F	$H\beta$	4860,74
f	$H\gamma$	4340,10
h	$H\delta$	4101,20

Beaucoup de physiciens ont essayé, en vain, de trouver une expression mathématique qui relierait ces quatre longueurs d'onde. Au début des années **1880**, Eduard Hagenbach-Bischoff, professeur de mathématiques à l'université de Bâle, connaissant la passion de Balmer pour les nombres, lui a suggéré de se pencher sur le problème.

Balmer remarqua que ces nombres forment une suite qui converge vers 3645,6 **Å**. En divisant la longueur d'onde de chacune des raies par la valeur limite, il a obtenu une nouvelle suite de coefficients qui pouvaient s'exprimer sous forme fractionnaire : 9/5, 4/3, environ 8/7 et 9/8.

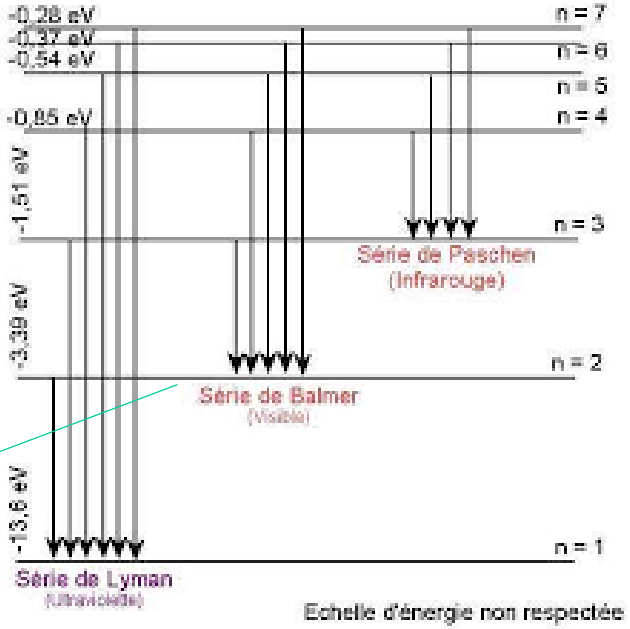
Pour un mathématicien habitué à manipuler les nombres entiers, il était aisé d'écrire

$$\frac{9}{5} = \frac{3^2}{3^2 - 2^2}$$

$$\frac{4}{3} = \frac{16}{12} = \frac{4^2}{4^2 - 2^2}$$

$$\frac{8}{7} \simeq \frac{25}{21} = \frac{5^2}{5^2 - 2^2}$$

$$\frac{9}{8} = \frac{36}{32} = \frac{6^2}{6^2 - 2^2}$$



$$\lambda_m = B \times \frac{m^2}{m^2 - n^2} \text{ avec } n = 2,\ m = 3, 4, 5, 6 \text{ et } B = 3645,6 \text{ Å}$$

Solvay à Poincaré

15 juin 1911
Ernest Solvay
Bruxelles, 43 Rue des Champs Élysées

Confidentiel

Invitation à un "Conseil scientifique international pour élucider quelques questions d'actualité des théories moléculaires et cinétiques."

Très honoré Monsieur,

Selon toutes les apparences, nous nous trouvons en ce moment au milieu d'une évolution nouvelle des principes sur lesquels était basée la théorie classique moléculaire et cinétique de la matière.

D'une part cette théorie, en son développement raisonné, conduit à une formule de radiation dont la validité est en désaccord avec tous les résultats de l'expérience ; d'autre part, de cette même théorie découlent des thèses au sujet de la chaleur spécifique (lois sur la chaleur spécifique des gaz polyatomiques vis à vis des variations de la température, validité de la règle de Dulong et Petit jusqu'aux températures les plus basses) qui sont également réfutées par de nombreuses mesures.

Ainsi que l'on démontré notamment MM. Planck et Einstein, ces contradictions disparaissent lorsqu'on oppose certaines limites au mouvement des électrons et des atomes en cas d'oscillations autour d'une position de repos (doctrine des degrés d'énergie) ; mais cette interprétation s'éloigne à son tour si considérablement des équations du mouvement des points matériels employés jusqu'ici, que son acceptation entraînerait nécessairement et incontestablement une vaste réforme de nos théories fondamentales actuelles.

Le soussigné, quoique étranger aux questions spéciales de ce genre, mais animé d'un sincère enthousiasme pour tous les problèmes dont l'étude élargit, en la développant, notre connaissance de la nature, a pensé qu'un échange de vues écrit et verbal entre des chercheurs s'occupant plus ou moins directement de ces questions, pourrait, sinon amener une décision définitive, du moins frayer la voie, par une critique préparatoire, à la solutions de ces problèmes. Un grand pas dans la voie du développement de l'atomisme serait déjà fait si l'on pouvait établir clairement lesquelles de nos interprétations moléculaires et cinétiques sont d'accord avec les résultats de l'observation et lesquelles devront au contraire subir une transformation intégrale.

Dans ce but, le soussigné vous propose de participer à un "Conseil scientifique", qui se tiendrait à Bruxelles, du dimanche 29 Octobre au samedi 4 Novembre 1911, en réunissant en Comité restreint quelques professeurs éminents.

Ce Conseil serait composé comme suit :

Président : M. Lorentz (Hollande) ;

Secrétaires : MM. R. Goldschmidt (Belgique), de Broglie (France) ;

Membres : MM. Jeans, Larmor, lord Rayleigh, Rutherford, Schuster, J.J. Thomson (Angleterre) ;

Nernst, Planck, Rubens, Sommerfeld, Warburg, W. Wien (Allemagne) ;

Brillouin, Mme Curie, Langevin, Perrin, H. Poincaré (France) ;

Einstein, Hasenöhrl (Autriche)

Kamerlingh Onnes, Van der Waals ; (Hollande)

Knudsen (Danemark)

Les sujets de conférence traités seraient les suivants :
1 - Déduction de la formule de Rayleigh sur la radiation.
2 - Comparaison de la théorie cinétique des gaz parfaits avec les résultats de l'expérience.
3 - Application de la théorie cinétique aux émulsions.
4 - La théorie cinétique de la chaleur spécifique d'après Clausius, Maxwell et Boltzmann.
5 - La formule de radiation et la théorie des degrés d'énergie ("Quantenhypothese").
6 - Chaleur spécifique et théorie des degrés.
7 - Application de la théorie des degrés à une série de problèmes de nature physique.
8 - Application de la théorie des degrés à une série de problèmes de nature physico-chimique et chimique.
Pour chacune de ces questions nous prierons un membre particulièrement compétent de bien vouloir écrire un rapport préalable. Ces rapports, écrits en français, en allemand ou en anglais, seront imprimés et distribués aux divers membres, si possibles avant la fin de Septembre ; plus tard ils seront réunis en un volume, avec le compte-rendu des discussions qu'ils provoqueront.

N'étant pas homme de science spécialisée, je ne pourrai traiter des sujets ci-indiqués ; mais, ayant fait de longue date une étude générale de la gravité en vue d'en tirer des conséquences sur la constitution de la matière et de l'énergie, je me propose d'en communiquer un résumé à la séance d'ouverture du "Conseil", estimant que certains de ses travaux pourraient éventuellement en être influencés.

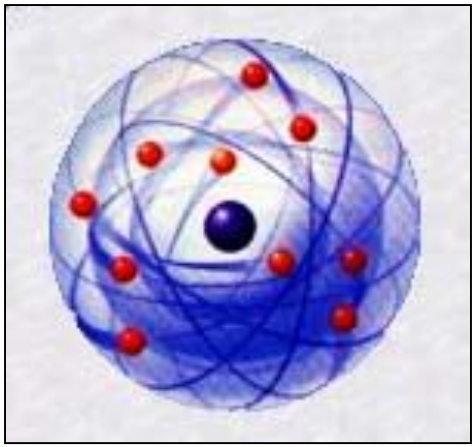
Pour permettre à tous les invités de participer, j'offre à chacun d'eux une indemnité de 1000 francs pour frais de voyage.

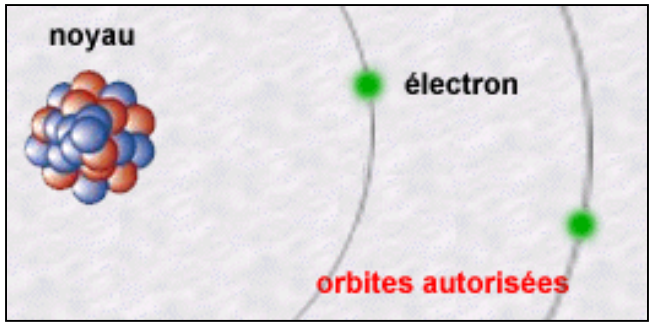
Les demandes éventuelles et les réponses doivent être adressées à Monsieur le Prof. Dr W. Nernst, Am Karlsbad 26[a], Berlin W. 35.

J'espère pouvoir compter sur votre collaboration et vous prie d'agréer, très honoré Monsieur, l'assurance de ma haute considération.

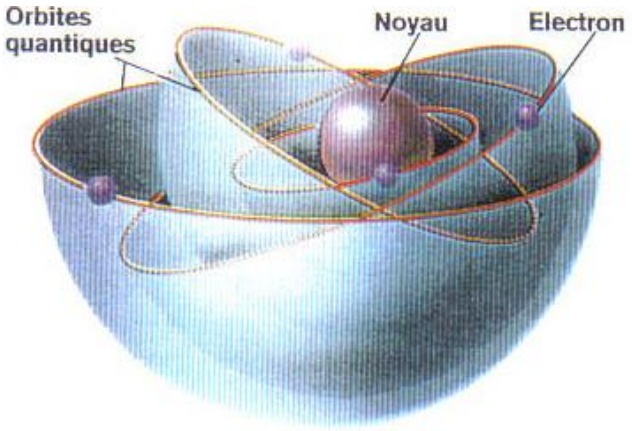
E. Solvay

Niels Bohr (1885-1962)

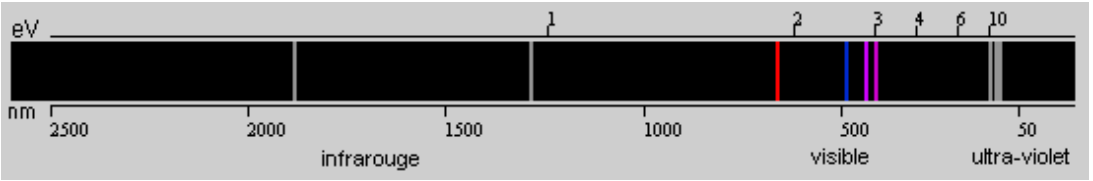




Niels Bohr



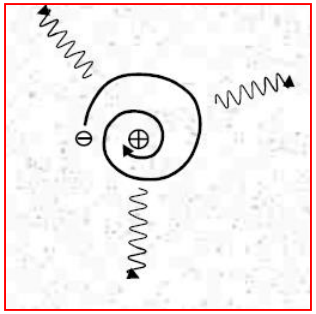
(1913)



NIELS BOHR INSTITUTET
1920

✓ Selon le modèle de **Bohr**, l'électron dans l'atome d'hydrogène est confiné sur certaines orbites circulaires.

✓ Chaque passage d'une orbite à l'autre s'accompagne de l'émission ou de l'absorption d'un photon. Ces principes imposent que les électrons d'un atome ne peuvent s'assembler autour du noyau que selon certains modes bien définis : *les états quantiques*.



✓Ainsi, pour **Bohr**, l'électron n'est plus libre de *spiraler* de plus en plus près du noyau, car il existe une orbite de plus basse énergie autour du noyau au-delà de laquelle l'électron ne peut plus descendre

✓Au fil des années qui suivirent, le modèle de **Bohr** continua à être étudié et perfectionné. Seules quelques questions à son sujet se faisaient entendre:

- *Quelles causes provoquent le changement d'orbites des électrons ?*
- *Peut-on prédire les instants ou s'effectuent ces « sauts quantiques ?*

principe de moindre action

✓ Le principe de moindre action est un des grands principes de la Physique, il englobe:

- le principe de **Fermat** pour l'optique
- le principe de moindre action en mécanique

(1698-1759)

✓ Si l'énergie est constante on a le principe de **Maupertuis**

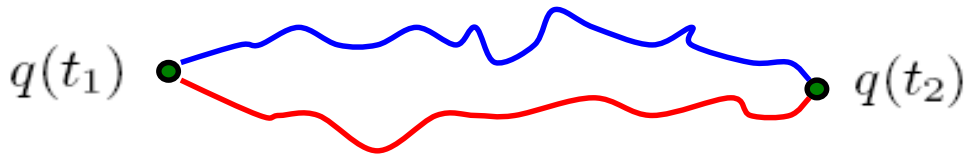
✓ La trajectoire réelle correspond à l'action minimale, soit:

$$S = \int_{t_1}^{t_2} L dt$$

L : lagrangien du système = T-U

S : action

→ $\delta \int \vec{p} \cdot d\vec{l} = 0$



1736

RELATION

D'UN VOYAGE

AU FOND DE LA LAPPONIE

Pour trouver un ancien Monument.

PENDANT que nous étions à *Pello*, où ſe termine l'arc du méridien que nous avons meſuré, les Finnois & les Lappons nous parlerent ſouvent d'un monument, qu'ils regardent comme la merveille de leur pays, & dans lequel ils croient qu'eſt renfermée la ſcience de toutes les choſes qu'ils ignorent. Ce monument devoit être ſitué à 25 ou 30 lieues au nord, au milieu de cette vaſte forêt qui ſépare la mer de Bottnie de l'Océan.

Pour y arriver, il falloit ſe faire traîner ſur la neige par des rennes,

Héros de la physique, Argonautes nouveaux
Qui franchissez les monts, qui traversez les eaux
Dont le travail immense et l'exacte mesure
De la Terre étonnée ont fixé la figure.
Dévoilez ces ressorts, qui font la pesanteur.
Vous connaissez les lois qu'établit son auteur.

Voltaire

(1698-1759)

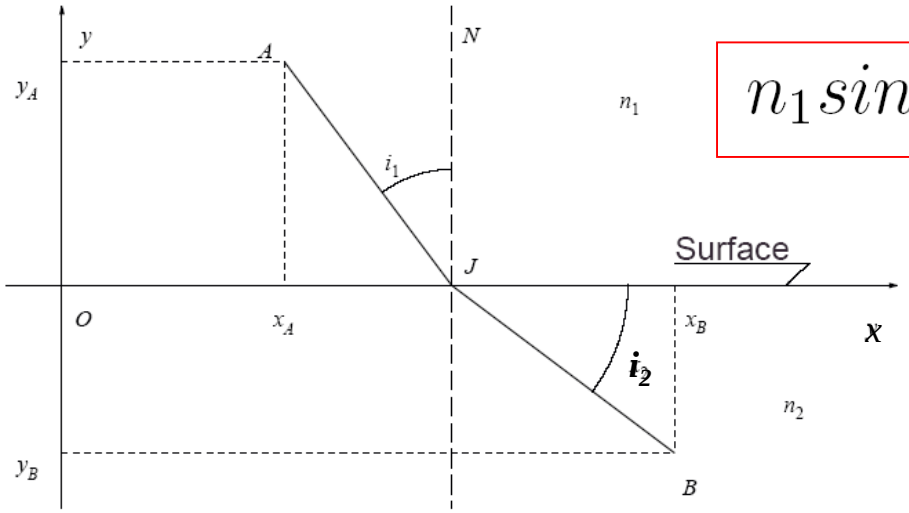
Avec **Celsius** et **Clairaut**

Ce que Newton connut sans sortir de chez lui : Maupertuis et la forme de la terre dans les années 1730

Rob Iliffe

« Les expéditions organisées par l'Académie des Sciences dans les années 1730 (afin de mesurer la longueur d'un degré en suivant un méridien au niveau de l'Equateur péruvien et de la Laponie) occupent une place à part dans l'histoire des sciences. Le résultat des mesures faites à cette occasion en Suède et au Pérou confirmèrent que la Terre était aplatie et non allongée, et les aspects techniques de cette entreprise requirent la collaboration et l'expertise de disciplines aussi variées que la géographie, la géodésie, la cartographie, l'astronomie et les mathématiques, disciplines qui devaient à la fois en sortir transformées et rapprochées les unes des autres. »

Pour aller d'un point-source ***A*** a un point-détecteur ***B*** après une réflexion ou une réfraction, la lumière suit un chemin pour lequel le temps de parcours est extrémal (i.e. minimal ou maximal).



$$n_1 sin(i_1) = n_2 sin(i_2)$$

$$n = \frac{c}{v}$$

Principe de **Fermat** : *parmi toutes les trajectoires possibles, celle effectivement suivie par un rayon lumineux correspond à un chemin optique extrémal.*

$$L_{AB} = nl_{AB}$$

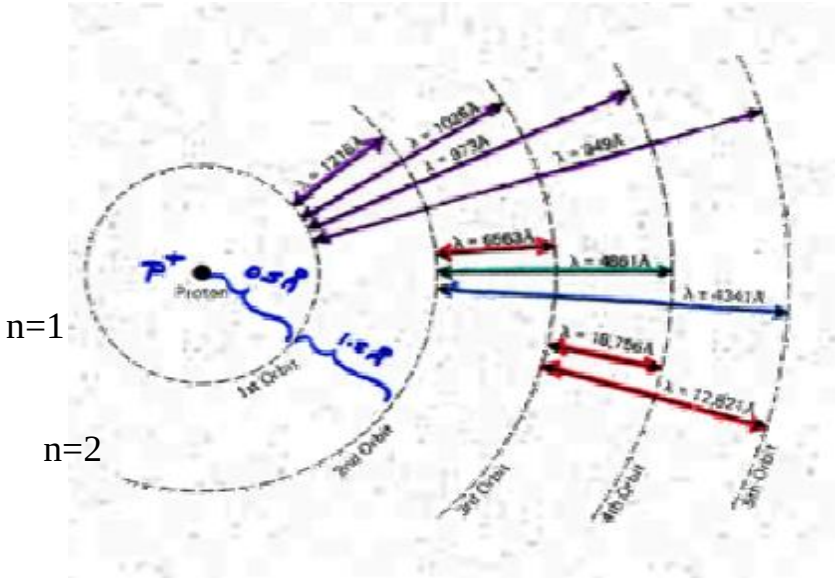
✓Si la lumière se propage dans un milieu d'indice donné **isotrope**, **transparent et homogène** alors l'indice est constant et le temps de parcours est minimal. Il correspond alors à une trajectoire rectiligne. Le principe de Fermat permet donc de démontrer le principe de la propagation rectiligne.

✓Il permet aussi de prévoir les phénomènes de **réfraction** et de **réflexion** d'un rayon lumineux se propageant dans deux milieux d'indice différents et d'établir simplement les lois de **Snell-Descartes**.

Niels Bohr postule la quantification de l'action

$$\oint \vec{p} \cdot d\vec{l} = nh \qquad n \in \mathbb{N}^*$$

Ce principe est compatible avec l'hypothèse des quanta de Planck



Printed April 27, 1918

ON THE QUANTUM THEORY OF LINE-SPECTRA

N. BOHR

DEDICATED TO THE MEMORY OF MY VENERATED TEACHER
PROFESSOR C. CHRISTIANSEN
October 9, 1843 † November 28, 1917

INTRODUCTION

In an attempt to develop certain outlines of a theory of line-spectra based on a suitable application of the fundamental ideas introduced by Planck in his theory of temperature-radiation to the theory of the nucleus atom of Sir Ernest Rutherford, the writer has shown that it is possible in this way to obtain a simple interpretation of some of the main laws governing the line-spectra of the elements, and especially to obtain a deduction of the well known Balmer formula for the hydrogen spectrum [1]). The theory in the form given allowed of a detailed discussion only in the case of periodic systems, and obviously was not able to account in detail for the characteristic difference between the hydrogen spectrum and the spectra of other elements, or for the characteristic effects on the hydrogen spectrum of external electric and magnetic fields. Recently, however, a way out of this difficulty has been opened by Sommerfeld [2]) who, by introducing a suitable

Editor's note. This paper is the Introduction and Part I (pp. 1–36) of the paper *On the Quantum Theory of Line-spectra*, which was first published (1918–1922) in the Mémoires de l'Académie Royale des Sciences et des Lettres de Danemark, Copenhague, Section des Sciences, 8me série t. IV, n° 1, fasc. 1–3 (D. Kgl. Danske Vidensk. Selsk. Skrifter, Naturvidensk. og Mathem. Afd. 8. Række, IV.1, 1–3). The Introduction was signed 'Copenhagen, November 1917.' The titles of Parts II and III, which are not reproduced here, are respectively *On the hydrogen spectrum* and *On the spectra of elements of higher atomic number*.

[1]) N. Bohr, Phil. Mag. **26** (1913) 1, 476, 857; **27** (1914) 506; **29** (1915) 332; **30** (1915) 394.

[2]) A. Sommerfeld, Ber. Akad. München. 1915, pp. 425, 459; 1916, p. 131; 1917 p. 83. Ann. d. Phys. **51** (1916) 1.

Dualité Onde-Corpuscule I

- La dualité onde-corpuscule autour de la lumière.
  - Interprétation de l'optique par Newton et Huygens
  - Expériences sur les interférences et la diffraction
  - *La théorie des Quanta de Planck*
  - L'effet photoélectrique: Einstein
  - Les photons et l'effet Compton

Isaac Newton

(1642-1727)

Christiaan Huygens

(1629-1695)

POINTS

BERNARD MAITTE

La lumière

SCIENCES

Petite introduction sur l'Optique

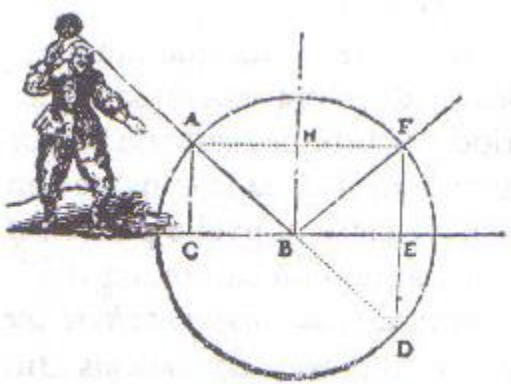
A partir du XVII^{ème} étude de la lumière et des phénomènes lumineux; on commence à s'intéresser à **la nature de la lumière**

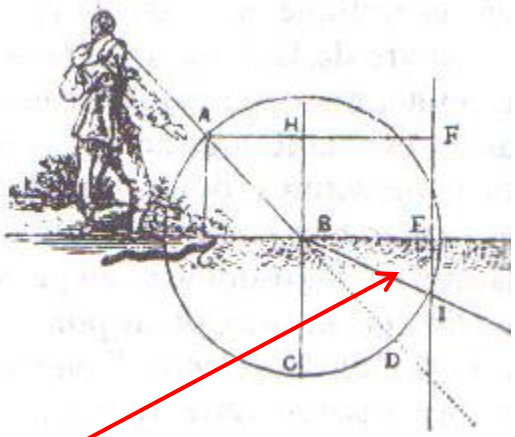
Avant: travaux dans le cadre d'une réflexion centrée sur le problème de la vision.

✓ Johannes Kepler (1571-1630) assimile définitivement l'œil à un dispositif optique.

✓ A partir de René Descartes (1596-1650) et Kepler trois champs d'investigation s'ouvrent:

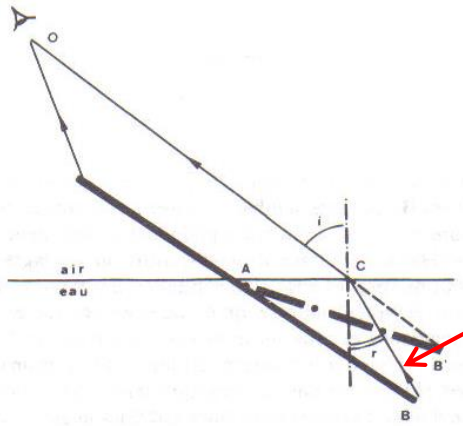
- nature physique de la lumière.
- transmission de l'image rétinienne au cerveau (anatomie, physiologie).
- représentation mentale.



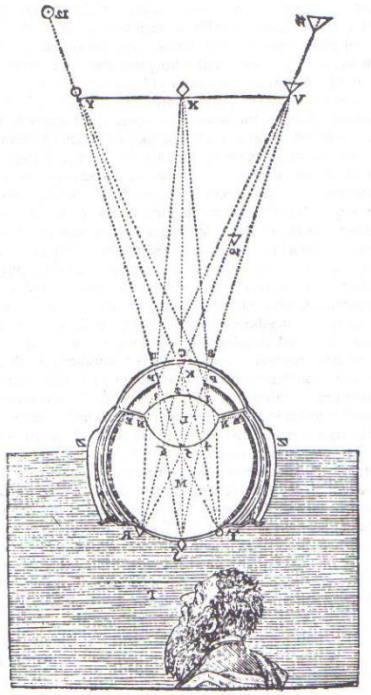


René Descartes, *La Dioptrique* (**1637**)

http://www.ac-nice.fr/philo/textes/Descartes-Dioptrique.htm



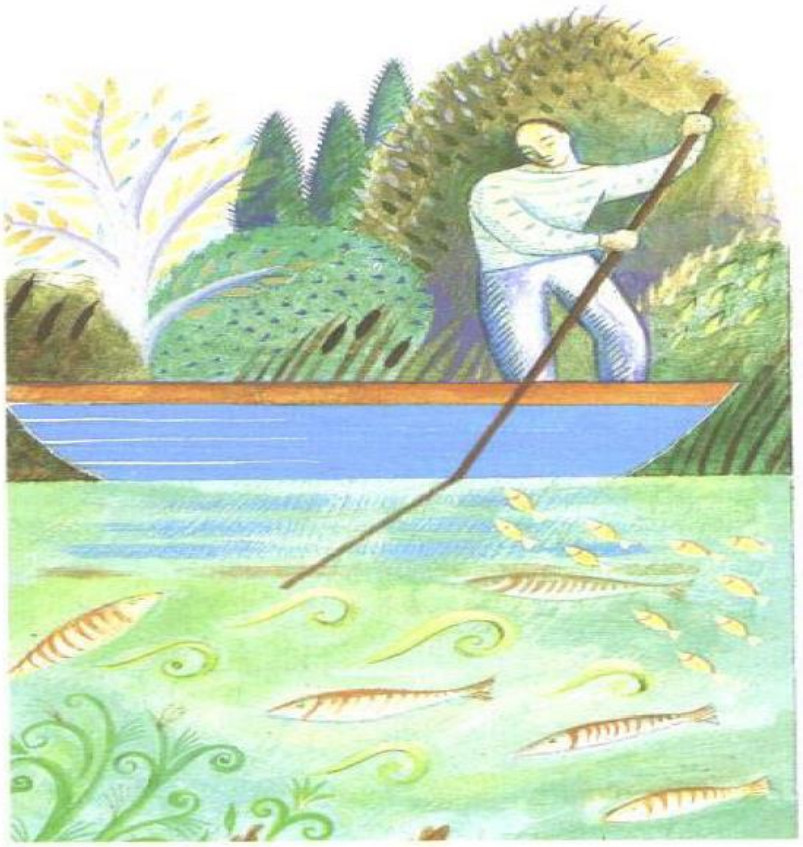
?



✓ Tables depuis Witelo (1230-1300)
✓ Snell vers **1625** découvre la loi
et en parle à Descartes…

(1580-1626)

RÉFLEXION ET RÉFRACTION



CI-DESSUS **On peut faire une expérience de réfraction simple en plongeant un bâton dans de l'eau claire. Ce sont les rayons lumineux qui sont déviés, et non le bâton qui est brisé.**

René Descartes, *La Dioptrique* (Extraits)

Discours premier
De la lumière

Toute la conduite de notre vie dépend de nos sens, entre lesquels celui de la vue étant le plus universel et le plus noble, il n'y a point de doute que les inventions qui servent à augmenter sa puissance ne soient des plus utiles qui puissent être. Et il est malaisé d'en trouver aucune qui l'augmente davantage que celle de ces merveilleuses lunettes qui, n'étant en usage que depuis peu, nous ont déjà découvert de nouveaux astres dans le ciel, et d'autres nouveaux objets dessus la terre, en plus grand nombre que ne sont ceux que nous y avions vus auparavant : en sorte que, portant notre vue beaucoup plus loin que n'avait coutume d'aller l'imagination de nos pères, elles semblent nous avoir ouvert le chemin, pour parvenir à une connaissance de la Nature beaucoup plus grande et plus parfaite qu'ils ne l'ont eue. Mais, à la honte de nos sciences, cette invention, si utile et si admirable, n'a premièrement été trouvée que par l'expérience et la fortune. Il y a environ trente ans, qu'un nommé Jacques Metius , de la ville d'Alcmar en Hollande, homme qui n'avait jamais étudié, bien qu'il eût un père et un frère qui ont fait profession des mathématiques, mais qui prenait particulièrement plaisir à faire des miroirs et verres brûlants, en composant même l'hiver avec de la glace, ainsi que l'expérience a montré qu'on en peut faire, ayant à cette occasion plusieurs verres de diverses formes, s'avisa par bonheur de regarder au travers de deux, dont l'un était un peu plus épais au milieu qu'aux extrémités, et l'autre au contraire beaucoup plus épais aux extrémités qu'au milieu, et il les appliqua si heureusement aux deux bouts d'un tuyau, que la première des lunettes dont nous parlons, en fut composée. Et c'est seulement sur ce patron que toutes les autres qu'on a vues depuis ont été faites, sans que personne encore, que je sache, ait suffisamment déterminé les figures que ces verres doivent avoir. Car, bien qu'il y ait eu depuis quantité de bons esprits, qui ont fort cultivé cette matière, et ont trouvé à son occasion plusieurs choses en l'Optique, qui valent mieux que ce que nous en avaient laissé les anciens, toutefois, à cause que les inventions un peu malaisées n'arrivent pas à leur dernier degré de perfection du premier coup, il est encore demeuré assez de difficultés en celle-ci, pour me donner sujet d'en écrire. Et d'autant que l'exécution des choses que je dirai doit dépendre de l'industrie des artisans, qui pour l'ordinaire n'ont point étudié, je tâcherai de me rendre intelligible à tout le monde, et de ne rien omettre, ni supposer, qu'on doive avoir appris des autres sciences. C'est pourquoi je commencerai par l'explication de la lumière et de ses rayons ; puis, ayant fait une brève description des parties de l'œil, je dirai particulièrement en quelle sorte se fait la vision ; et ensuite, ayant remarqué toutes les choses qui sont capables de la rendre plus parfaite, j'enseignerai comment elles y peuvent être ajoutées par les inventions que je décrirai.

https://fr.wikisource.org/wiki/La_Dioptrique_(%C3%A9d._Cousin)

Question centrale de l'Optique au milieu du XVII^{ème}:

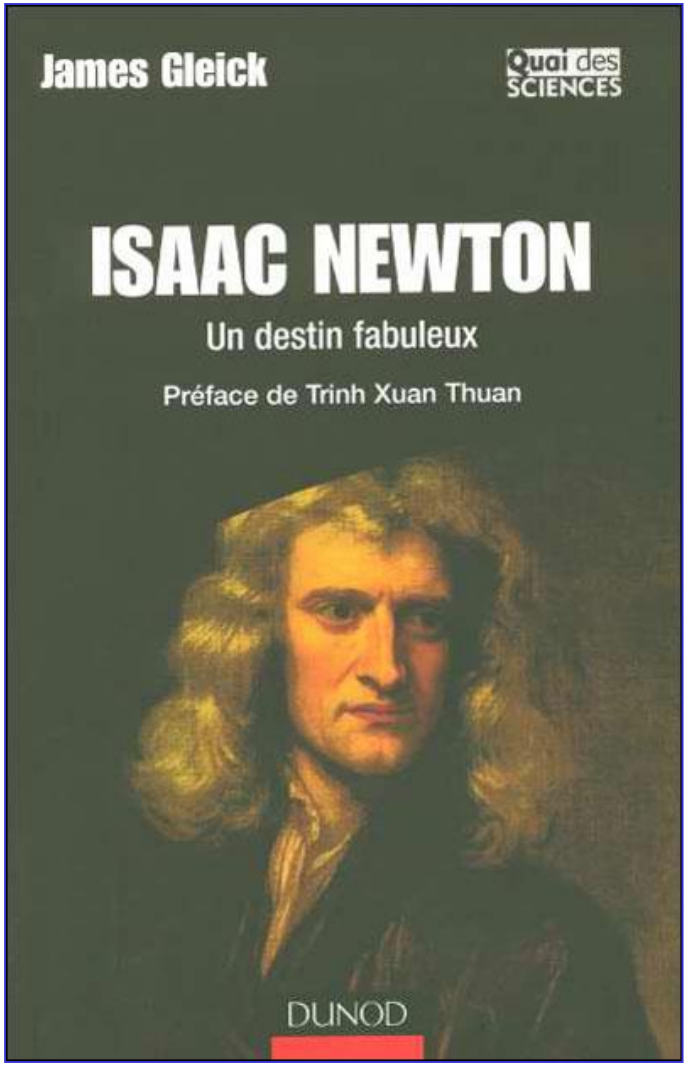
Comment la lumière voyage-t-elle, et sous quelle forme transporte-t-elle cette énergie ?

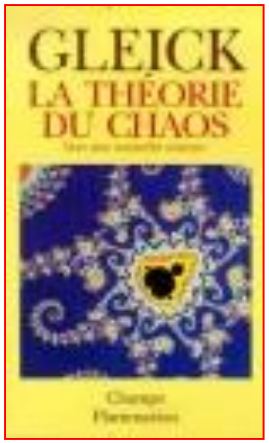
Deux écoles s'affrontent

Newton: ce sont des corps matériels, ou des particules qui transportent l'énergie (théorie de l'émission)

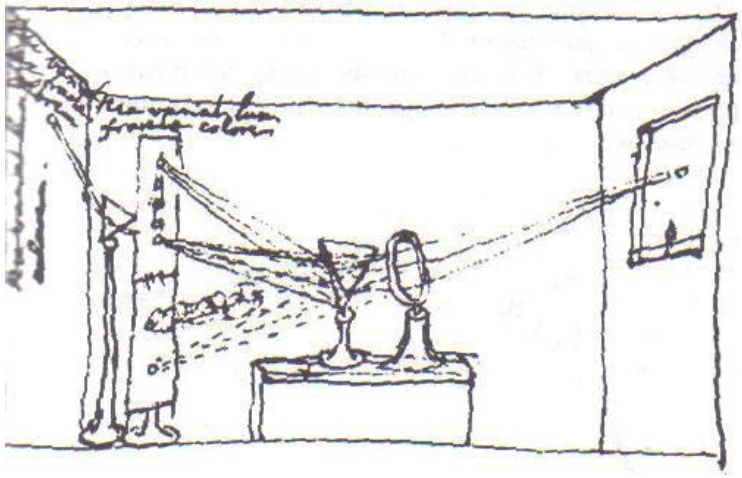
Huygens: ce sont des ondes qui transportent l'énergie (théorie des ondes)

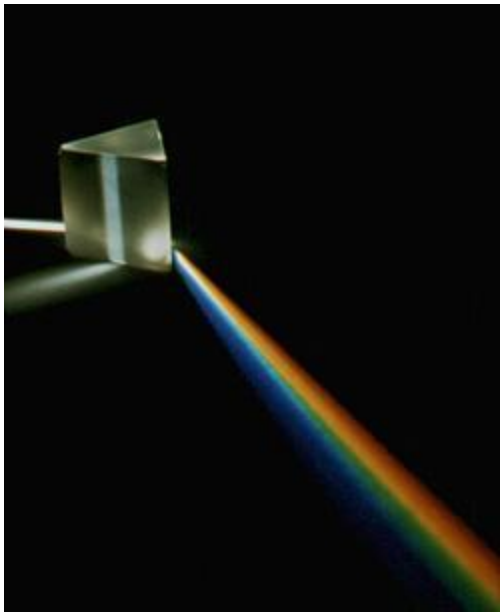
Théoricien de l'émission





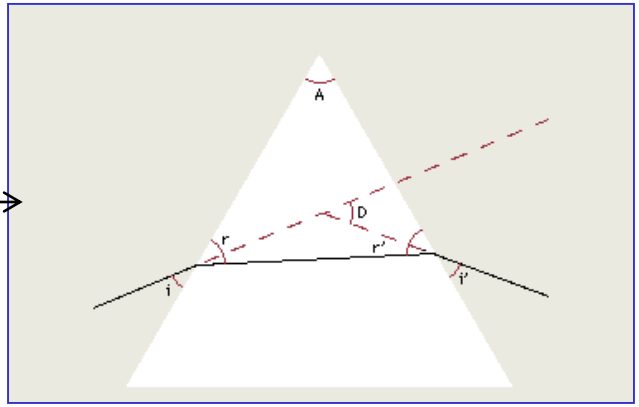
Prisme de Newton (1666)

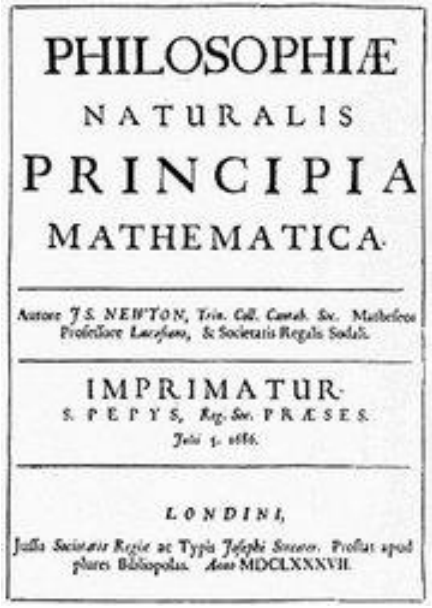




Lumière décomposée par un prisme

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



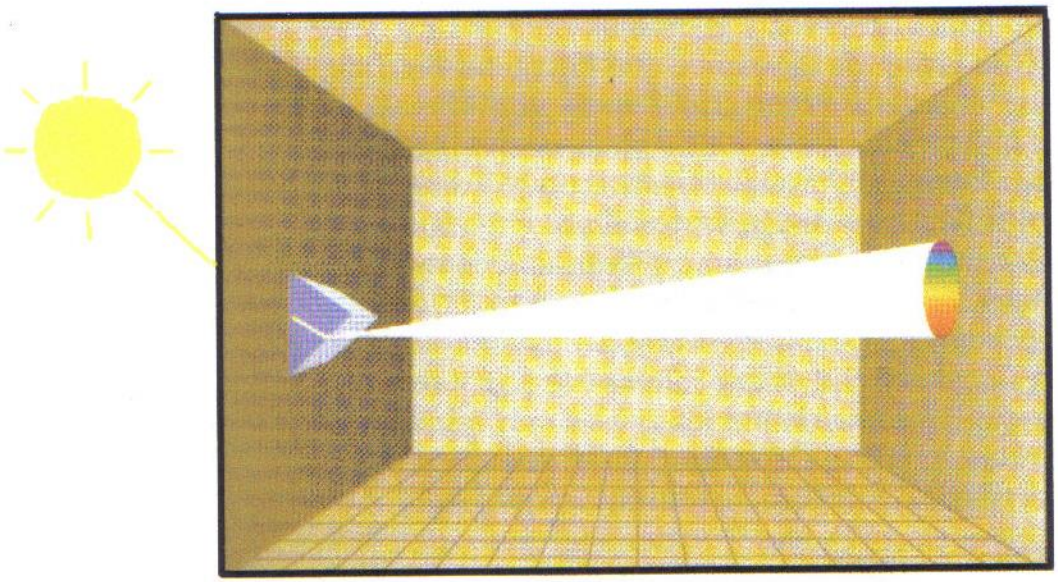


PHILOSOPHIÆ
NATURALIS
PRINCIPIA
MATHEMATICA

Autore J.S. NEWTON, Trin. Coll. Cantab. Soc. Matheseos Professore Lucasiano, & Societatis Regalis Sodali.

IMPRIMATUR
S. PEPYS, Reg. Soc. PRÆSES.
Julii 5. 1686.

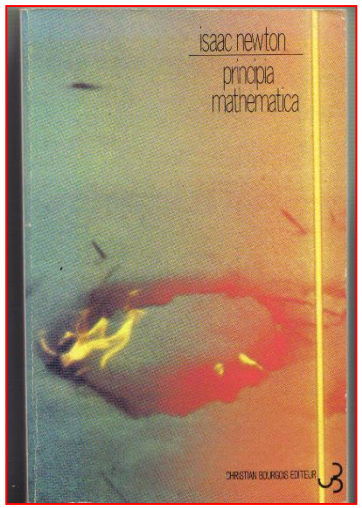
LONDINI,
Justu Societatis Regiæ ac Typis Josephi Streater. Prostat apud plures Bibliopolas. Anno MDCLXXXVII.

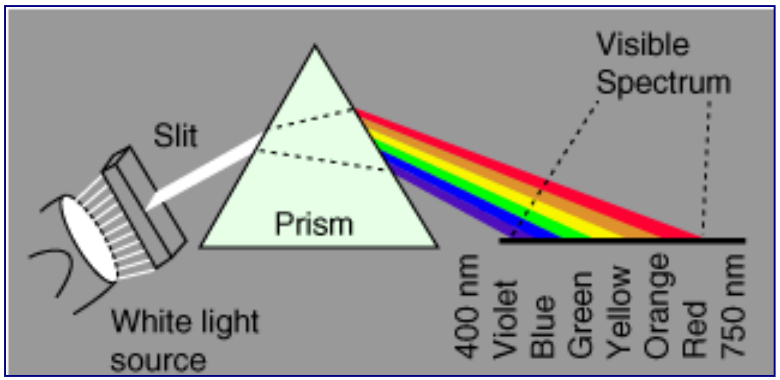


L'expérience de NEWTON : La décomposition de la lumière

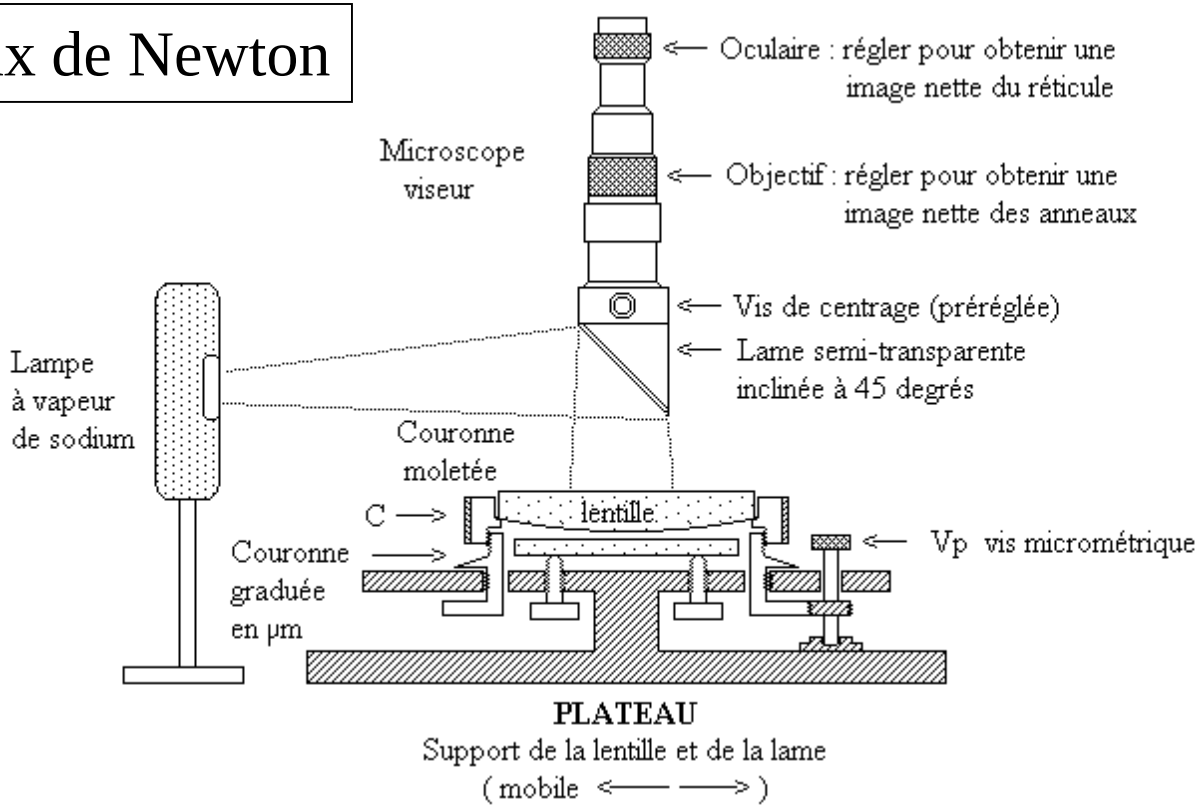
(1687)

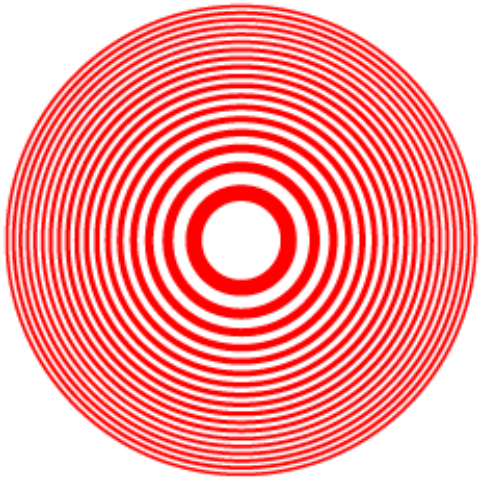
-Gravitation-

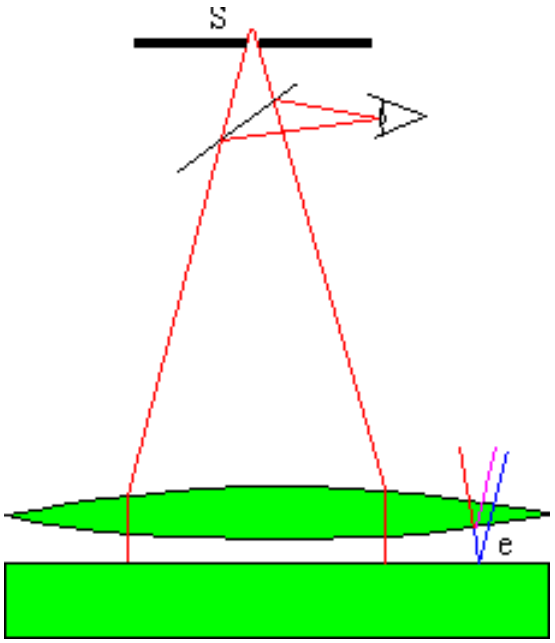




Les anneaux de Newton





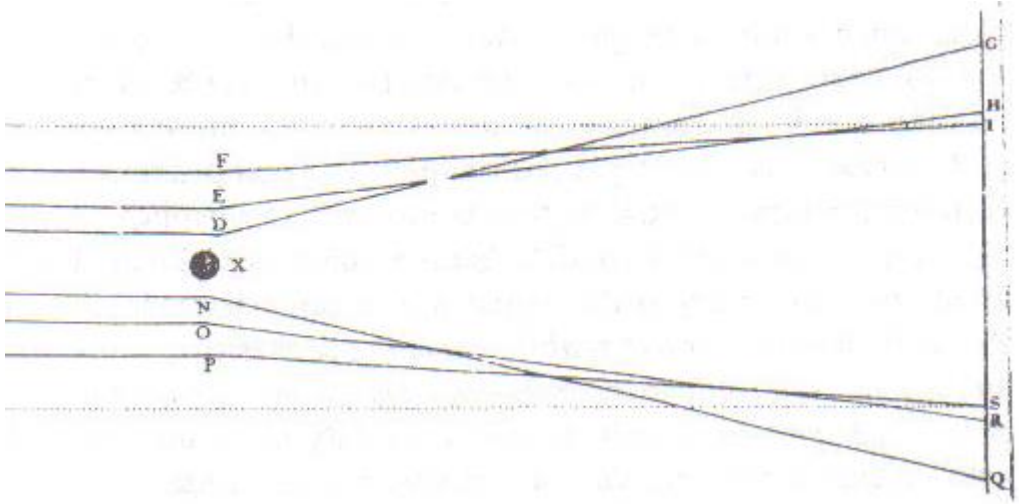


On considère deux surfaces réfléchissantes et sensiblement parallèles: un plan et une sphère de grand rayon. Le rayon en rouge (à droite du schéma) peut se réfléchir sur l'interface verre-air (rayon violet) ou franchir cet interface et se réfléchir sur le plan inférieur (rayon bleu). Ces deux rayons peuvent interférer en donnant des franges de lame mince.
Une réflexion sur une surface verre-air s'effectue sans déphasage alors qu'une réflexion sur une surface air-verre s'effectue avec un déphasage de 180°.

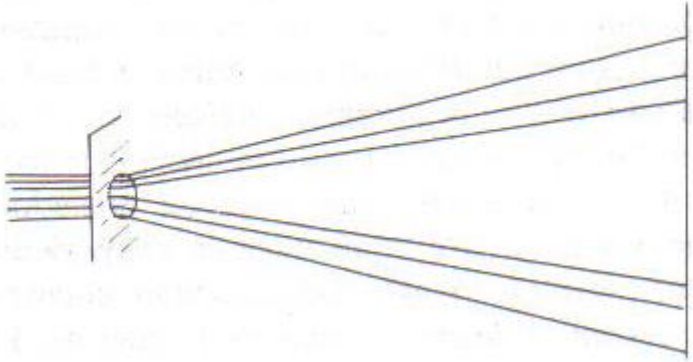
Si R est le rayon de courbure de la face inférieure de la lentille et si r est la distance du rayon avec l'axe optique du système, on a $r^2 = e(2R - e)$. Comme e est beaucoup plus petit que R, l'expression de la différence de marche est
$\delta = 2e + \lambda/2 = r^2/R + \lambda/2$.
Comme le système admet un axe de révolution, les franges sont des anneaux centrés sur l'axe.

Si la lentille est en contact optique avec le plan inférieur le premier anneau est sombre. Les anneaux suivants (la différence de marche augmente de une longueur d'onde entre deux anneaux) ont des rayons proportionnels à la racine carrée d'un nombre entier.

Les incohérences de la théorie de Newton (la taille des ombres)



Un faisceau passant près d'un fil de fer semble repoussé par celui-ci

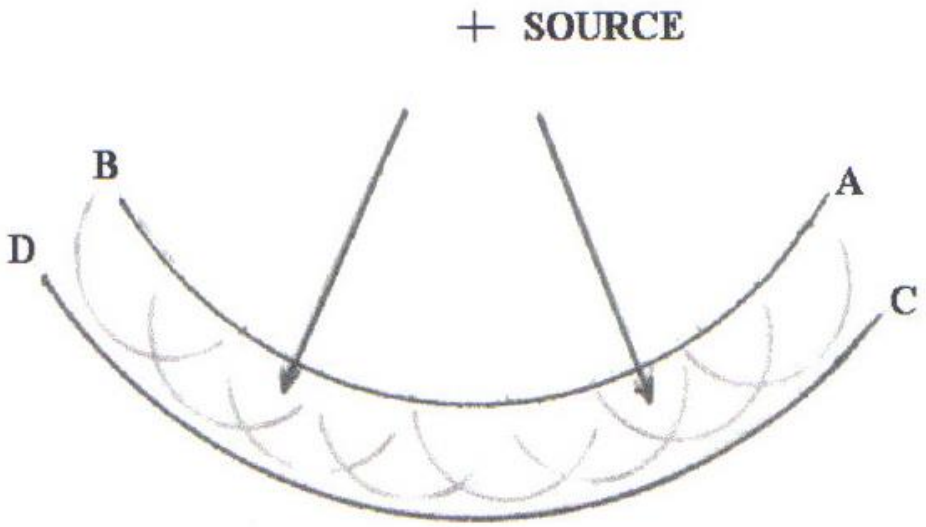


Un faisceau passant dans un trou percé dans une tôle semble attiré par celui-ci

Une même force réfringente (celle du fer) peut-elle donc infléchir la lumière en deux sens contraires ?

La théorie corpusculaire de Newton

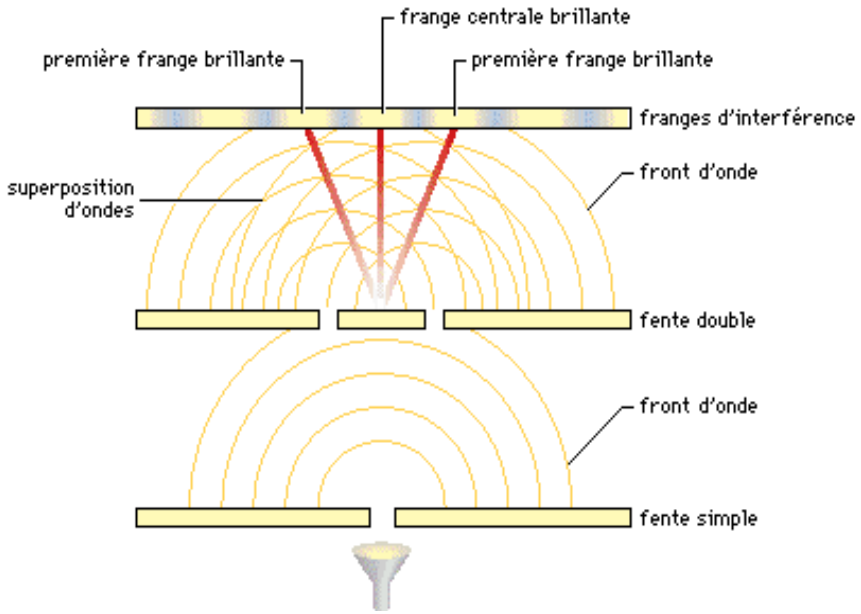
Isaac Newton, père de la théorie de la gravitation, se pencha assez tôt sur le problème de la nature de la lumière. Selon lui, la lumière est composée de corpuscules soumis à l'action de forces. De ce fait, Newton en fait une étude purement mécanique. Cela donna une grande crédibilité à sa théorie (la mécanique de l'époque est en pleine expansion) malgré les multiples incohérences que comporte son modèle. Il commence par lire les ouvrages de Kepler, Barrow et Hooke traitant du phénomène des couleurs. Il se procure un prisme et entreprend des expériences qui le mènent à la question suivante: les couleurs font-elles partie de la lumière ou sont-elles créées par la surface réfléchissante ? Après plusieurs expériences supplémentaires, il en arrive à la conclusion que les couleurs appartiennent à la lumière et postule que les corpuscules qui la composent sont de type différents, ce qui donne une impression de « couleur ». En ce qui concerne la réflexion, Newton se heurte à plusieurs problèmes et confronte sa théorie à celle de Descartes qui assimile la réflexion à un rebond de la lumière sur la surface des objets. Or, si la cause était effectivement un rebond, celui-ci résulterait des chocs des particules de lumière sur les particules constitutives des corps; l'intensité de la réflexion étant la plus grande dans le vide, il devrait y avoir plus de parties constitutives dans le vide que dans le verre ! Newton ne peut que rejeter le modèle cartésien. Selon les principes de sa nouvelle mécanique, la déviation ne peut alors que résulter de l'action d'une *force*. Selon lui, cette force est perpendiculaire à la surface de réflexion et s'exerce au point où la lumière frappe la surface. Elle agit à très faible distance et son intensité décroît avec l'éloignement du plan. Pourtant un même rayon peut-être ou réfléchi ou réfracté par un même milieu. Newton le sait et tente de résoudre ce problème par le calcul. Il retrouve ainsi les lois de Descartes et postule que la vitesse de la lumière doit être plus grande dans les milieux à fort indice que dans ceux à faible indice. Cette conclusion avait déjà été qualifiée d'absurde par Fermat et Grimaldi. Newton répond alors que « les corps transparents [doivent avoir] assez de pores libres pour transmettre la lumière sans obstacle ». Si la *force réfractante* est assez intense, il y a réflexion, sinon la lumière est juste déviée et c'est la réfraction. Newton parvient ainsi à résoudre le paradoxe précédent. Il va même plus loin en expliquant la dispersion des couleurs dans un prisme en postulant que les particules de lumière ont des *masses* différentes. Elles sont donc déviées différemment selon la relation fondamentale de la dynamique : $\mathbf{F} = m.\mathbf{a}$ et il en va de même pour la diffraction de Grimaldi. Newton peut donc formuler sa théorie de la lumière: ***elle est composée de corpuscules de masses différentes émis par une source et qui se propagent dans le vide. Lorsqu'elles arrivent à la surface d'un milieu, ces particules subissent l'action d'une force réfringente excitée par eux, perpendiculaire à cette surface, proportionnelle à la densité du corps heurté et qui s'exerce à faible distance de celui-ci. Cette force, en déviant la trajectoire des corpuscules cause à la fois la réflexion, la réfraction, la dispersion et la diffraction***. Cependant, Newton sait que sa théorie est loin d'être parfaite. L'idée d'une seule force est séduisante mais comment se fait-il qu'un seul pinceau monochromatique subisse des effets différents, *en même temps*, comme la réflexion partielle lors de la réfraction ? Grimaldi n'avait-il pas précisé que la diffraction ne s'apparente nullement avec les phénomènes de réflexion et de réfraction ? Devant ces incohérences, Newton va utiliser toute une série d'artefacts, il va réintroduire l'éther et les ondes, dissimuler ses erreurs sous des artifices de langage dans ses Traités, aboutir à des insuffisances toujours plus grandes, il attendra trente-quatre ans avant qu'en 1704, Hooke et Huygens morts, il décide de publier ses travaux menés de 1666 à 1670, il parvient même à expliquer l'optique par sa théorie de la gravité ! Newton n'est plus maître des ses explications. Il le sent et il abandonne la physique pour l'alchimie. Parallèlement, en Europe, Huygens a eu le temps de fonder sa théorie ondulatoire de la lumière



Le principe de HUYGENS utilisé pour déterminer le front d'onde CD quand AB est donné

Huygens est à l'origine de la théorie ondulatoire de la lumière: chaque point d'ondes en mouvement est lui-même source de nouvelles ondes.

Le fentes de Thomas Young (1801)

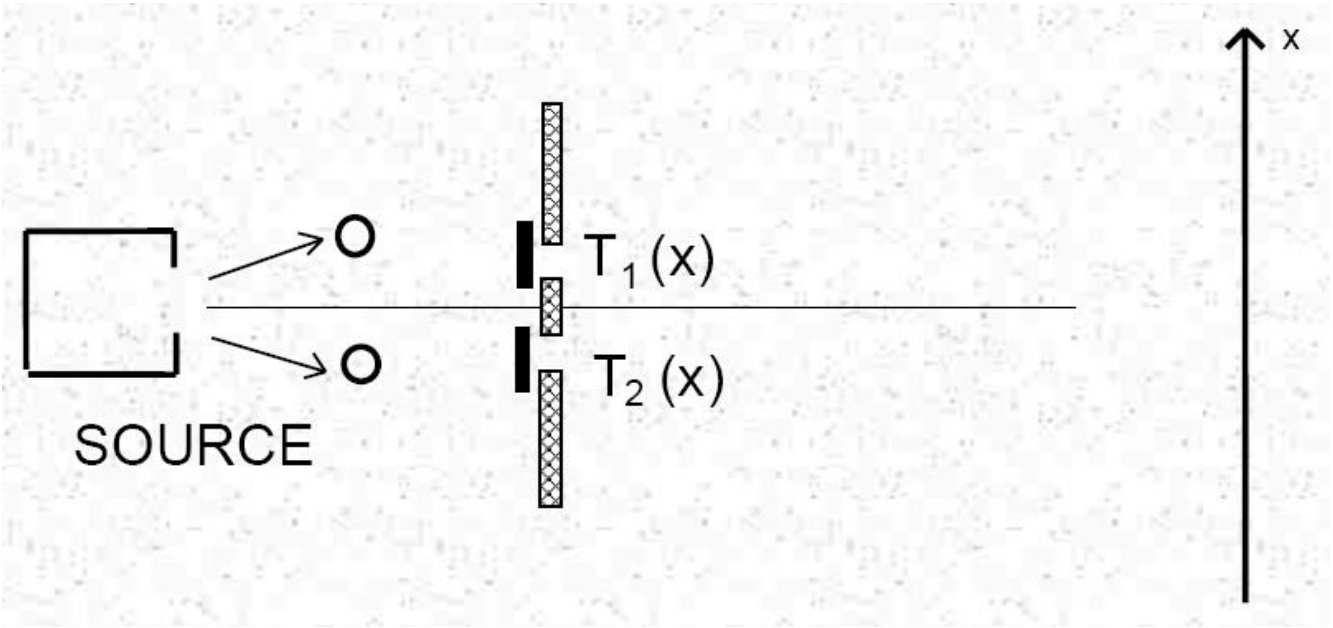


Lampe à vapeur de sodium

Nature ondulatoire de la lumière

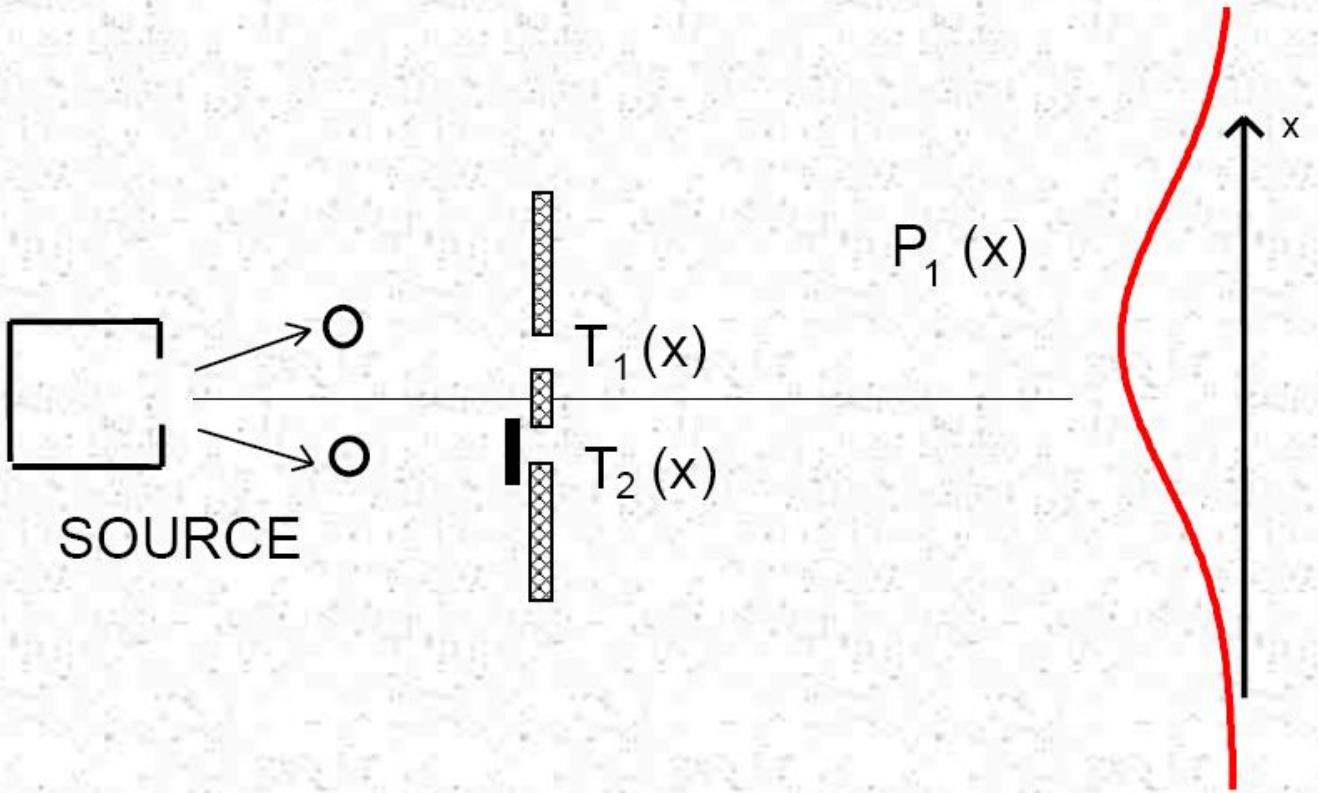
Expérience *cruciale* car elle vérifie définitivement la théorie ondulatoire de **Huygens**

Thomas Young (1773-1829)

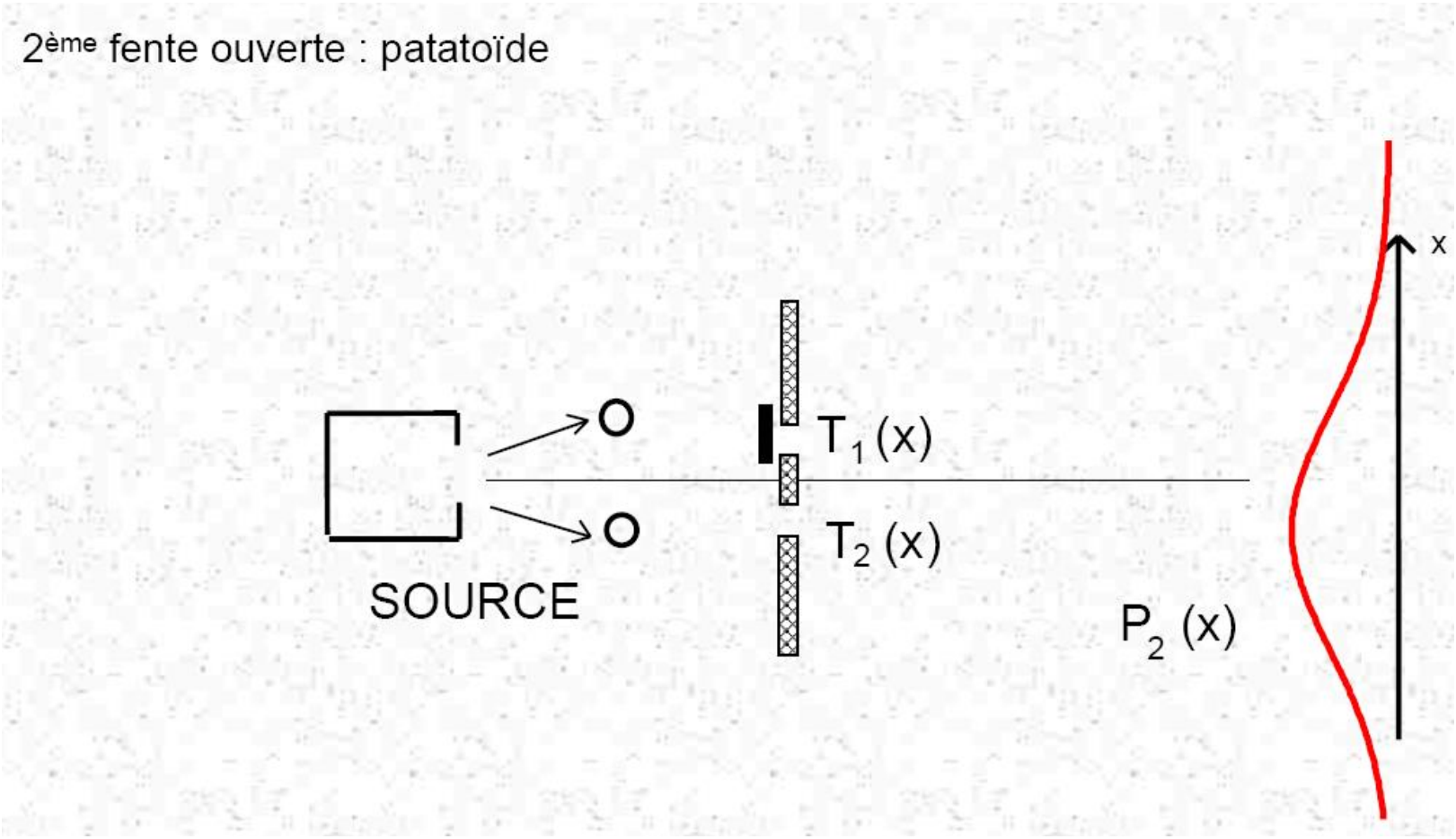


Phénomène d'interférence (**1801**)

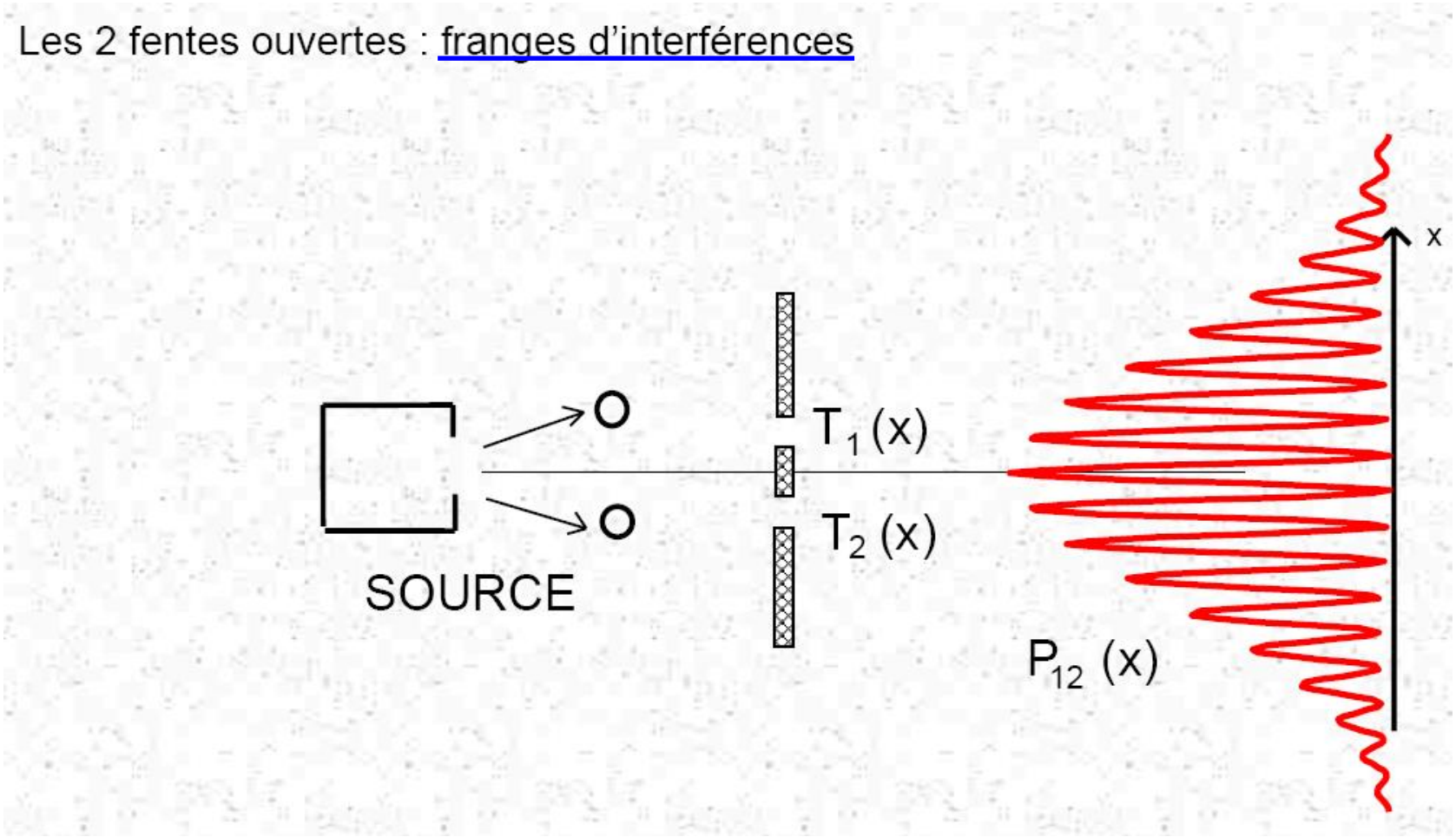
1ère fente ouverte : patatoïde



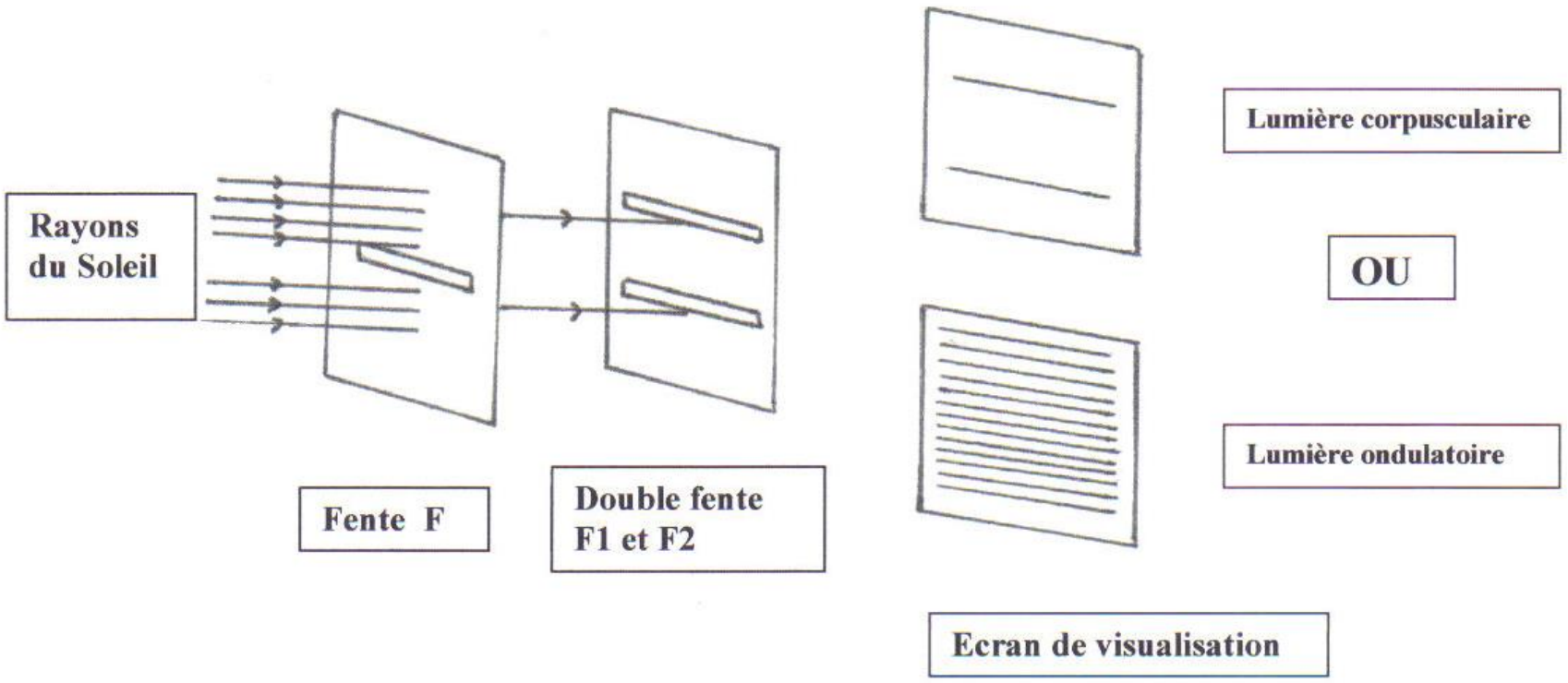
2ème fente ouverte : patatoïde



Les 2 fentes ouvertes : franges d'interférences



En résumé…



La lumière issue d'une certaine source (Young utilisa le soleil) passe par une fente F dans un premier écran, produisant ainsi un étroit faisceau de rayons parallèles, puis par deux autres fentes parallèles F_1 et F_2, très proches l'une de l'autre dans un deuxième écran. Si la lumière consistait en des particules, deux lignes brillantes devraient apparaître sur un troisième écran A placé derrière les fentes. Or Young observa au contraire une série de lignes brillantes sur un troisième écran B. Il montra que ce phénomène pouvait s'expliquer par les interférences entre les ondes.

La diffraction

Historiquement la diffraction a été découverte par Francesco Grimaldi. Elle fut interprétée correctement comme un comportement ondulatoire par Huygens, puis étudiée par Fresnel et Fraunhofer suite aux expériences de Young.

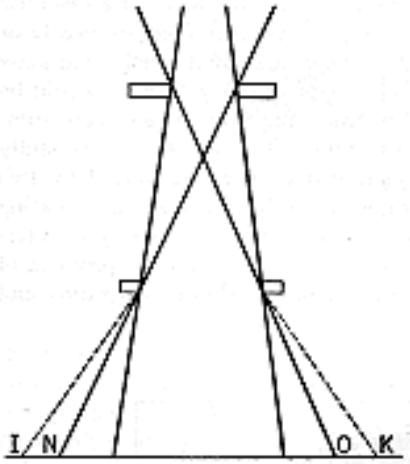
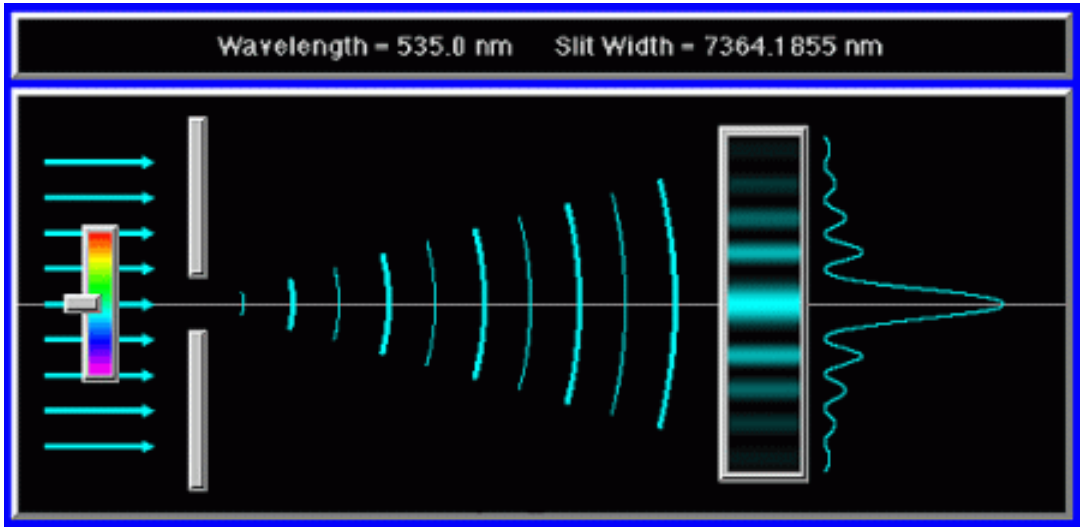


FIG. 315. GRIMALDI'S OBSERVATION OF DIFFRACTION



Francesco **Grimaldi** (1618-1663)

Ses recherches sont consignées dans son ouvrage : *Physicomathesis de lumine, coloribus, et iride, aliisque annexis* (Bologne, **1665**), paru après sa mort.

La diffraction s'observe avec la **lumière**, mais également avec le **son**, les **rayons X** (une onde électro-magnétique comme la lumière) ou la **matière**. Elle est une signature de la nature ondulatoire d'un phénomène.

« Soyons franc: tous ceux qui ne sont pas aveugles connaissent la lumière et pourtant nous ne pouvons pas en parler: nous ignorons sa nature et sa consistance. Les philosophes qui utilisent de grands mots vides de sens pour la définir ne font qu'augmenter les difficultés qu'ils prétendent vouloir résoudre. Il n'est pourtant pas téméraire de se lancer dans cette étude…à condition de le faire sans tenir compte de l'autorité des Maîtres mais en multipliant les expériences et en les interprétant »

Par ces phrases écrites en **1663**, Grimaldi se place résolument derrière Galilée: il se méfie des apriorismes, des évidences et va soumettre à l'expérience les résultats les mieux établis.

Grimaldi a l'idée de ne laisser entrer dans la pièce qu'un très fin filet lumineux et de le faire tomber sur un objet minuscule (un cheveu). Ce qu'il observe alors sur un écran placé derrière celui-ci l'étonne et le stupéfait: ***l'ombre du cheveu n'est ni parfaitement définie ni bordée de la zone de pénombre habituelle mais limitée par des franges colorées***. Ce phénomène n'a jamais été décrit avant lui.

Augustin Fresnel (1788-1827)

Il écrit un mémoire (1819) qui fait toujours date sur la diffraction. Les franges sont dues aux interférences des **ondelettes** émises par chaque point.

Théoricien de la diffraction

MÉMOIRE

SUR

LA DIFFRACTION DE LA LUMIÈRE;

PAR M. A. FRESNEL.*

INTRODUCTION.

AVANT de m'occuper spécialement des phénomènes nombreux et variés compris sous la dénomination commune de *diffraction*, je crois devoir présenter quelques considérations générales sur les deux systèmes qui ont partagé jusqu'à présent les savans relativement à la nature de la lumière. Newton a supposé que les molécules lumineuses lancées des corps qui nous éclairent arrivent directement jusqu'à nos yeux, où elles produisent par leur choc la sensation de la vision. Descartes, Hook, Huygens, Euler, ont pensé que

* En publiant ce Mémoire, qui a été couronné par l'Académie en 1819, on a fait quelques changemens à la rédaction du manuscrit déposé à l'Institut le 29 juillet 1818, mais sans apporter aucune modification à la théorie et aux expériences qu'il contient. Désirant y ajouter quelques expériences nouvelles et quelques développemens théoriques, on les a placés dans des notes à la suite du Mémoire.

la lumière résultait des vibrations d'un fluide universel extrêmement subtil, agité par les mouvemens rapides des particules des corps lumineux, de la même façon que l'air est ébranlé par les vibrations des corps sonores; en sorte que, dans ce système, ce ne sont plus les molécules du fluide en contact avec les corps lumineux qui parviennent à l'organe de la vue, mais seulement le mouvement qui leur a été imprimé.

La première hypothèse a l'avantage de conduire à des conséquences plus évidentes, parce que l'analyse mécanique s'y applique plus aisément : la seconde, au contraire, présente sous ce rapport de grandes difficultés. Mais, dans le choix d'un système, on ne doit avoir égard qu'à la simplicité des hypothèses; celle des calculs ne peut être d'aucun poids dans la balance des probabilités. La nature ne s'est pas embarrassée des difficultés d'analyse; elle n'a évité que la complication des moyens. Elle paraît s'être proposé de faire beaucoup avec peu : c'est un principe que le perfectionnement des sciences physiques appuie sans cesse de preuves nouvelles (1). L'astronomie, l'honneur de l'esprit humain, en présente sur-tout une confirmation frappante; toutes les lois de Kepler ont été ramenées par le génie de Newton à la seule loi de la gravitation, qui a servi ensuite à expliquer et même à découvrir les perturbations les plus compliquées et les moins apparentes des mouvemens planétaires.

Si l'on s'est quelquefois égaré en voulant simplifier les élémens d'une science, c'est qu'on a établi des systèmes avant d'avoir rassemblé un assez grand nombre de faits. Telle

(1) Si la chimie, dans ses progrès, paraît faire une exception à cet égard, cela tient sans doute à ce qu'elle est encore peu avancée, malgré les pas rapides qu'elle a faits depuis trente ans. Mais on peut déjà remarquer que les proportions des nombreuses combinaisons qu'elle présente, qui avaient paru d'abord soumises chacune à des lois particulières, sont embrassées maintenant dans des règles générales d'une grande simplicité.

Un ingénieur des Ponts et Chaussées père d 'une théorie fondamentale: Fresnel et l 'optique ondulatoire

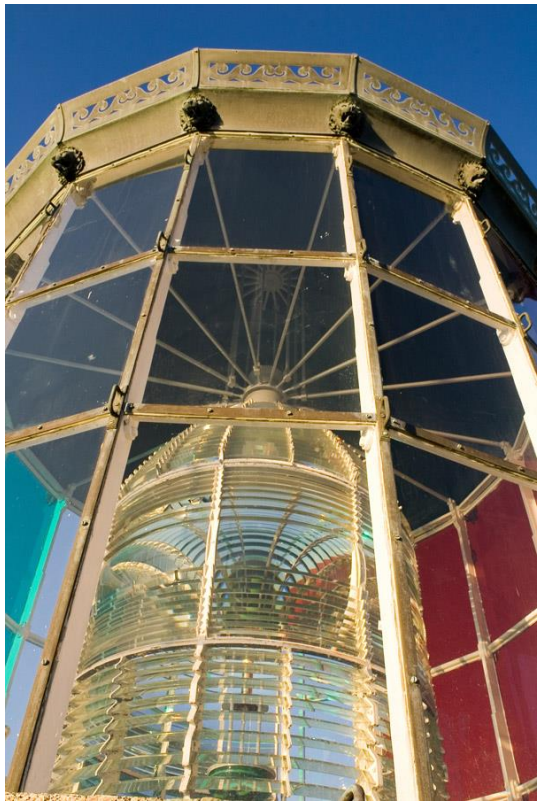
Il écrit un mémoire (1819) qui fait toujours date sur la diffraction. Les franges sont dues aux interférences des **ondelettes** émises par chaque point.

Il énonce un principe sur ce sujet « principe de Huygens Fresnel ».

Puis un autre avec Arago sur la polarisation de la lumière.

Il développe la fameuse lentille à échelon dite de Fresnel. « Les navigateurs sont prévenus que, dans le courant du mois de juillet 1823, il sera fait un changement au feu du phare de Cordouan, qui continuera d 'être un feu tournant à éclipses, mais présentera des éclats beaucoup plus vifs,plus courts et plus fréquents. »

Le phare de Corduan

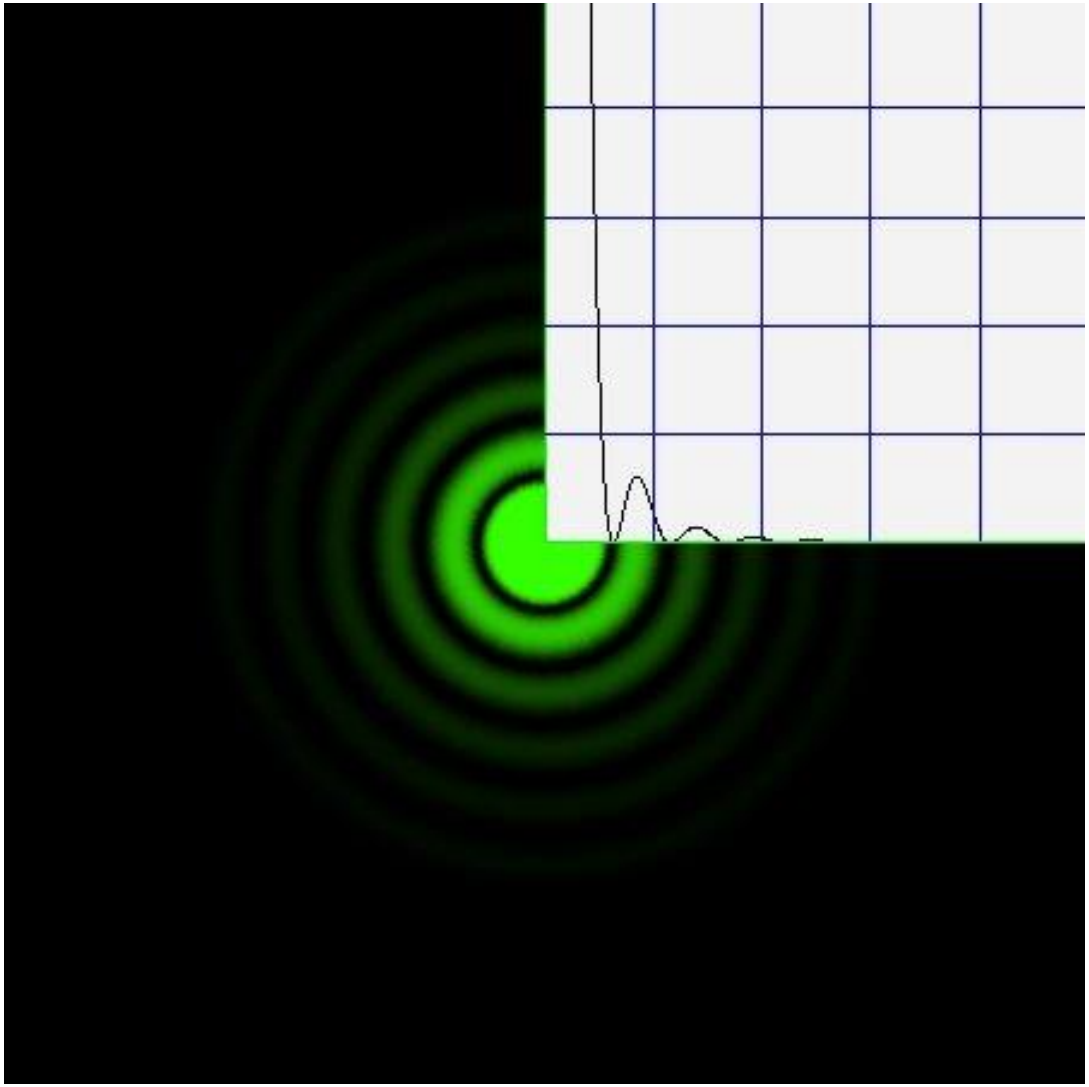


Reconstitution

Diffraction à l'infini (Joseph von Fraunhofer)

(1787-1826)

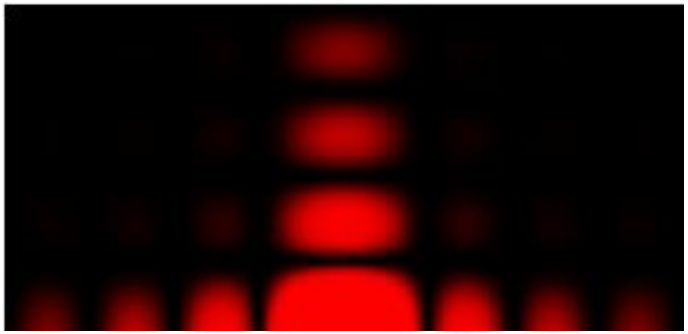
$$\sin\theta = 1.22\frac{\lambda}{d}$$

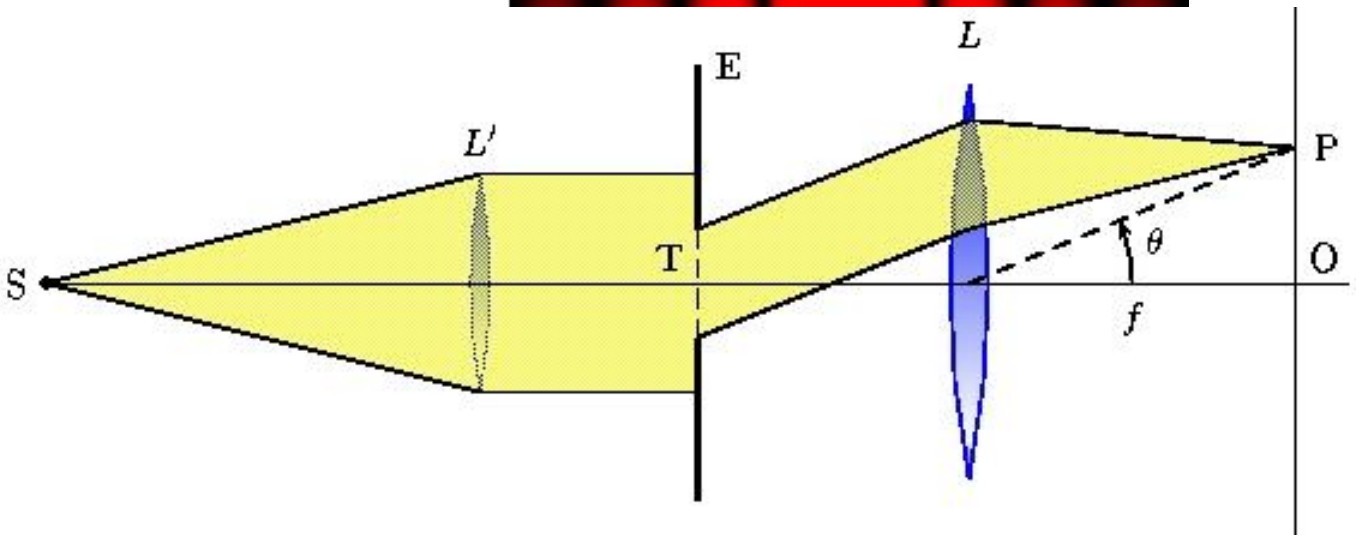


(Trou circulaire)

Tache d'Airy

diffraction par
un trou carré

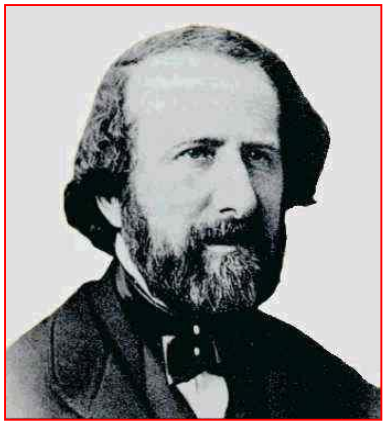




Vitesse de la lumière?

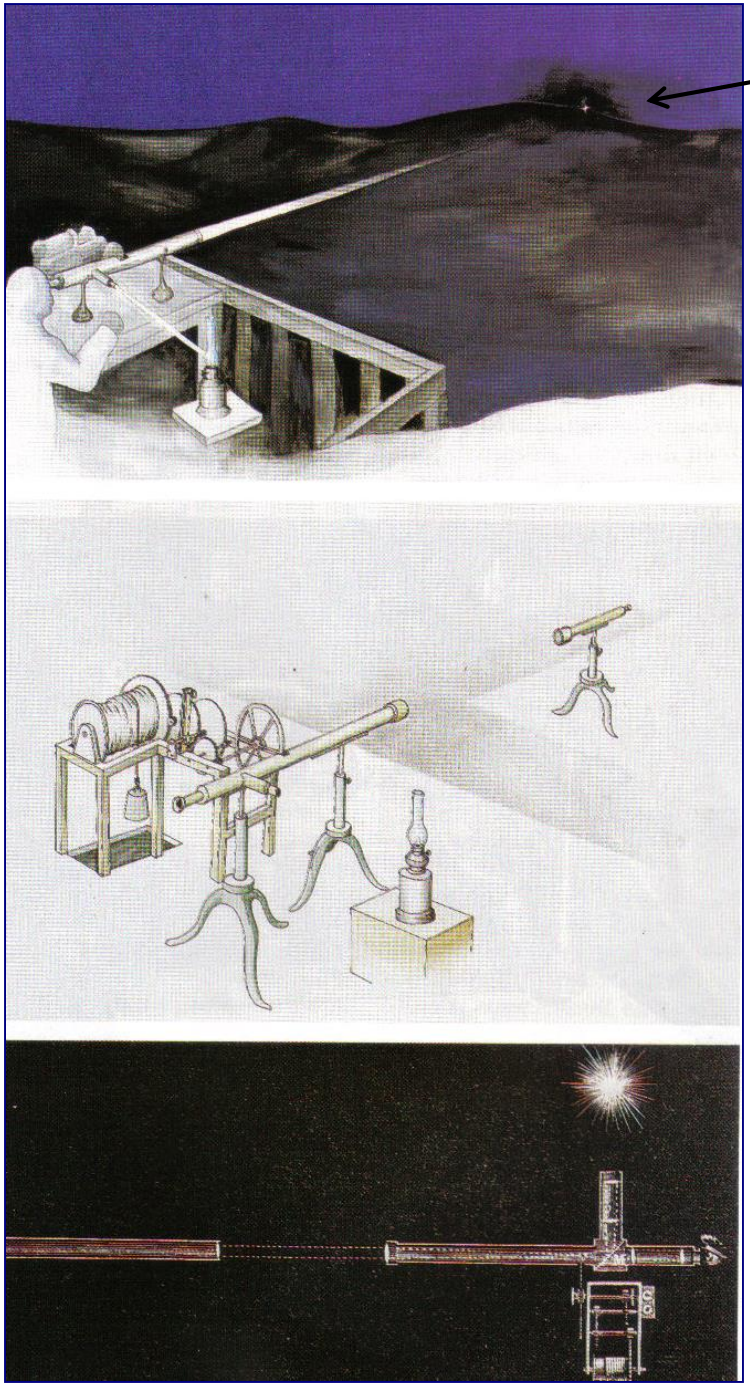
- Kepler et Descartes la pensait infinie
- Galilée et Newton la pensait finiemais n'ont pas pu la mesurer.
- Olaüs Römer (astronome danois 1644-1710) en observant Io un des satellites de Jupiter, l'estime à 300000 km/s.
- Hippolyte Fizeau (1819-1896) à l'aide de deux lunettes, l'une à Suresnes et l'autre à Montmartre, mesure 315000 km/s en 1849. Il montre expérimentalement, avec l'aide de Léon Foucault (1819-1868), que cette vitesse varie avec le milieu. La lumière se propage plus vite dans l'air que dans l'eau.

Plate-forme d'observation
de Fizeau à Suresnes



Hippolyte FIZEAU
(1819-1896)

L = 17 km aller-retour
T = L/V = 1/18000^{e} de seconde
720 dents = 1440 dent-creux
18000/1440 = 12,5 tours/seconde



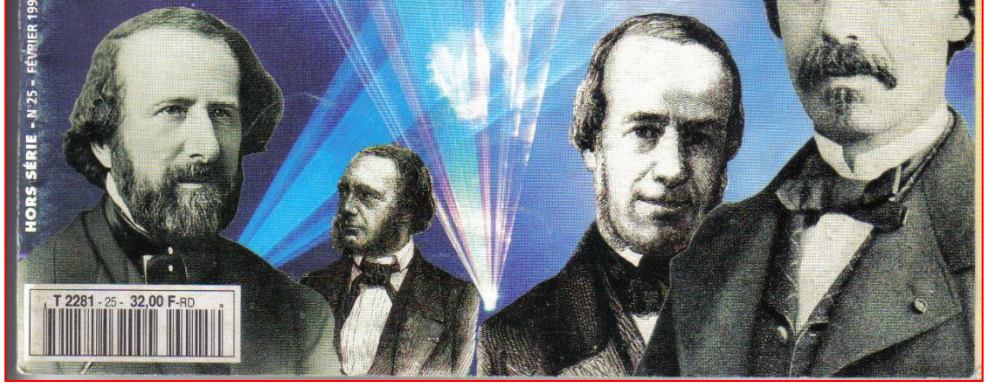
Butte Montmartre

ISSN 1157-4887

LES CAHIERS DE SCIENCE & VIE

LES GRANDES EXPERIENCES DE LA PHYSIQUE

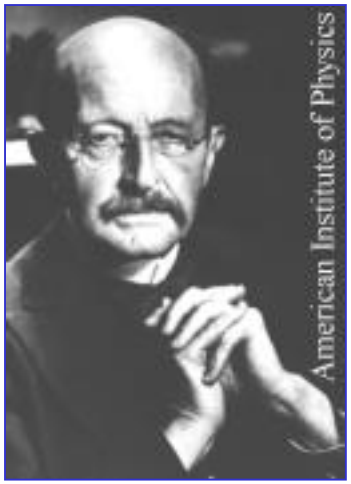
COMMENT ON A RÉUSSI À MESURER LA VITESSE DE LA LUMIÈRE



HORS SÉRIE - N°25 - FÉVRIER 1995. 32 F - 230 FB - 10,30 FS - PORTUGAL CONT 850 Esc - 50 Dh - 3 500 DT - 4 CAN 5,50 Réunion Antilles Guyane - 38F

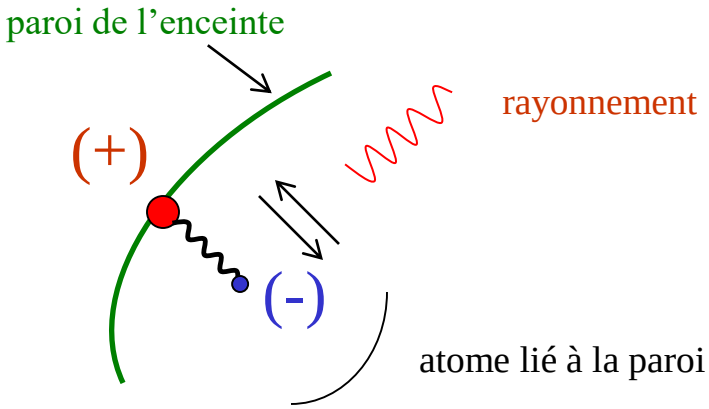
T 2281 - 25 - 32,00 F-RD

La théorie des quanta de Planck (1901)



Max Planck
(1900)

Les résonateurs de Planck



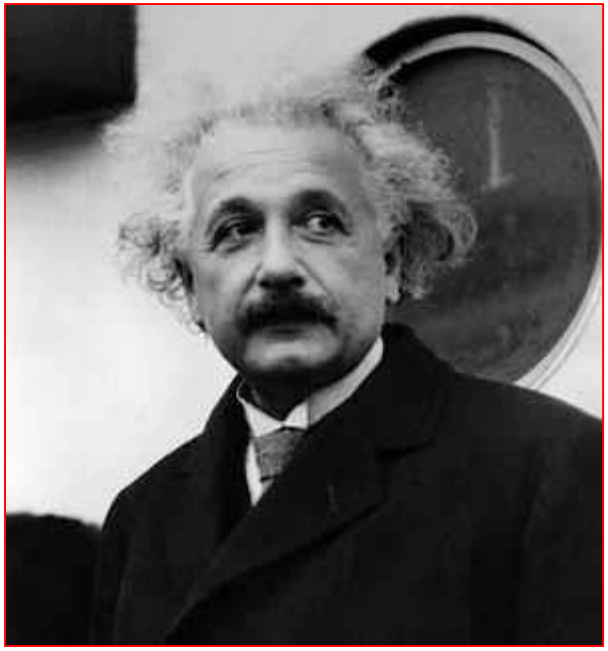
L'<u>échange d'énergie</u> entre un résonateur et le rayonnement se fait de **manière discontinue** → quantum d'énergie

(Article traduit en français sur le site…Planck_corpsnoir.pdf)

Sources et évolution de la physique quantique,
textes fondateurs,
José Leites Lopes et Bruno Escoubès,
EDP Sciences

$$\hbar\omega$$

1905: Une année de folie …



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

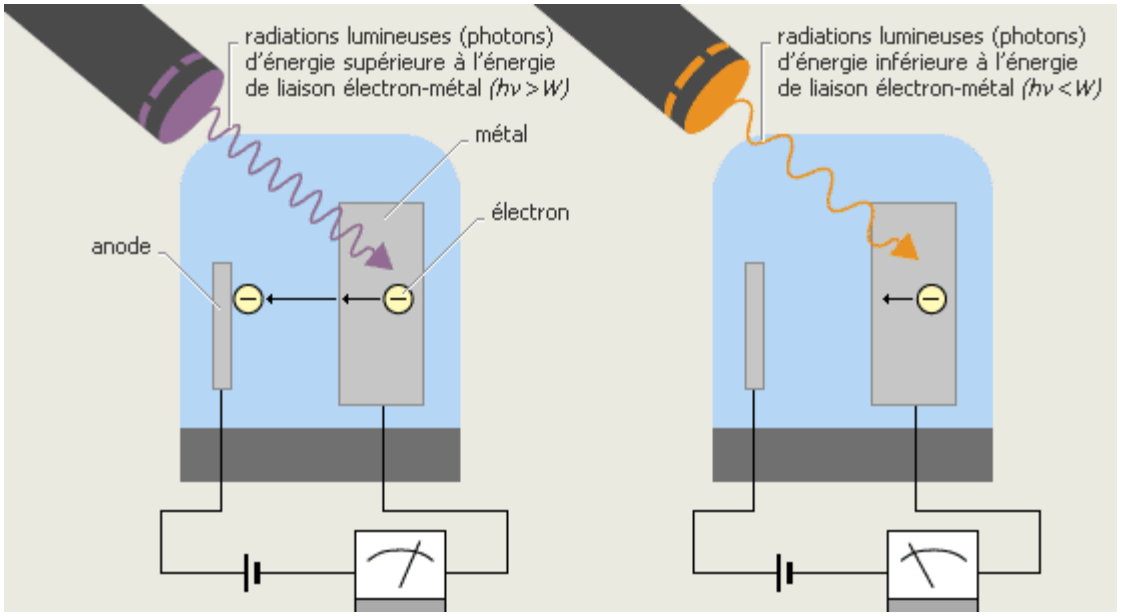
Albert Einstein (1879-1955)

L'effet photoélectrique

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

→ Le champ électromagnétique est *quantifié*

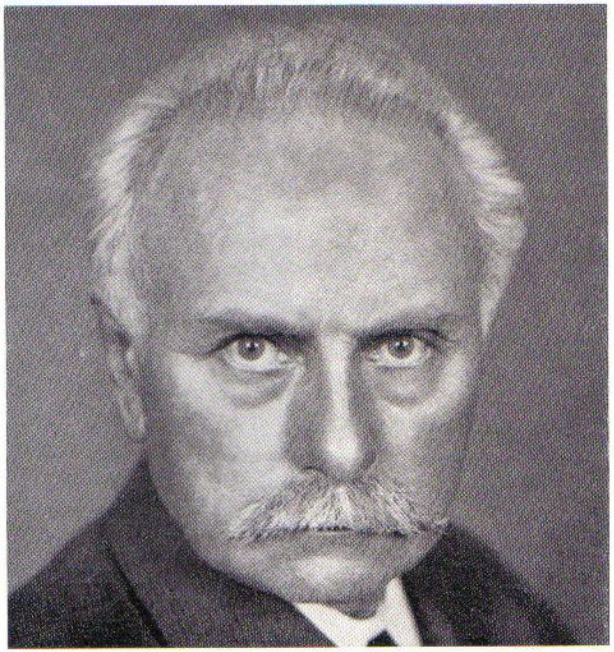
→ Les quanta de ce champ sont les **photons**



Aspect *corpusculaire* de la lumière: énergie $\hbar\omega$

Un coup de l'histoire: les seules références de l'article de 1905 …

Philipp Lenard · 1905



Johannes Stark · 1919

Prix Nobel

In 1924 **Stark**, began making speeches supporting Adolf Hitler. **Stark** shared Hitler's racist views and attacked the work of Jewish scientists in Germany, claiming that they were unconcerned with "scientific objectivity".

Stark joined the Nazi Party in 1930 and over the next few years he joined with another German physicist, **Phillipp Lenard**, to integrate physics with fascism. After Hitler came to power in 1933 Stark was appointed president of the Reich Physical-Technical Institute and head of the German Research Association.

In his book, *Nationalsocialismus und Wissenschaft* (1934) **Stark** argued that the scientist's first duty was to the nation. He denounced theoretical physics and stressed the need for research to be carried out that would help industry and arms production. **Stark** also argued that leading scientific positions in Nazi Germany should only he held by ethnic Germans.

Stark was particularly critical of Jewish scientists such as **Albert Einstein**. When **Werner Heisenberg** defended Einstein and his theory of relativity **Stark** wrote an article in the Nazi journal *Das Schwarze Korps*, where he described **Heisenberg** as a "White Jew".

After the Second World War **Stark** was arrested and sentenced to four years' imprisonment by a denazification court in 1947. **Johannes Stark** died on 21st June, 1957.

Das Schwarze Korps, journal de propagande Nazi

Himmler's letter to Heisenberg (English translation)

Very distinguished Professor Heisenberg !

Only today can I answer your letter of July 21, 1937, in which you direct yourself to me because of the article of Professor Stark in 'Das Schwarze Korps'.

Because you were recommended by my family I have had your case investigated with special care and precision.

I am glad that I can now inform you that I do not approve of the attack in 'Das Schwarze Korps' and that I have taken measures against any further attack against you.

I hope that I shall see you in Berlin in the fall, in November or December, so that we may talk things over thoroughly man to man.

With friendly greetings,
Heil Hitler!
Your,
H. Himmler

P.S. I consider it, however, best if in the future you make a distinction for your audience between the results of scientific research and the personal and political attitude of the scientists involved.

Les quanta de lumière et l'effet photoélectrique

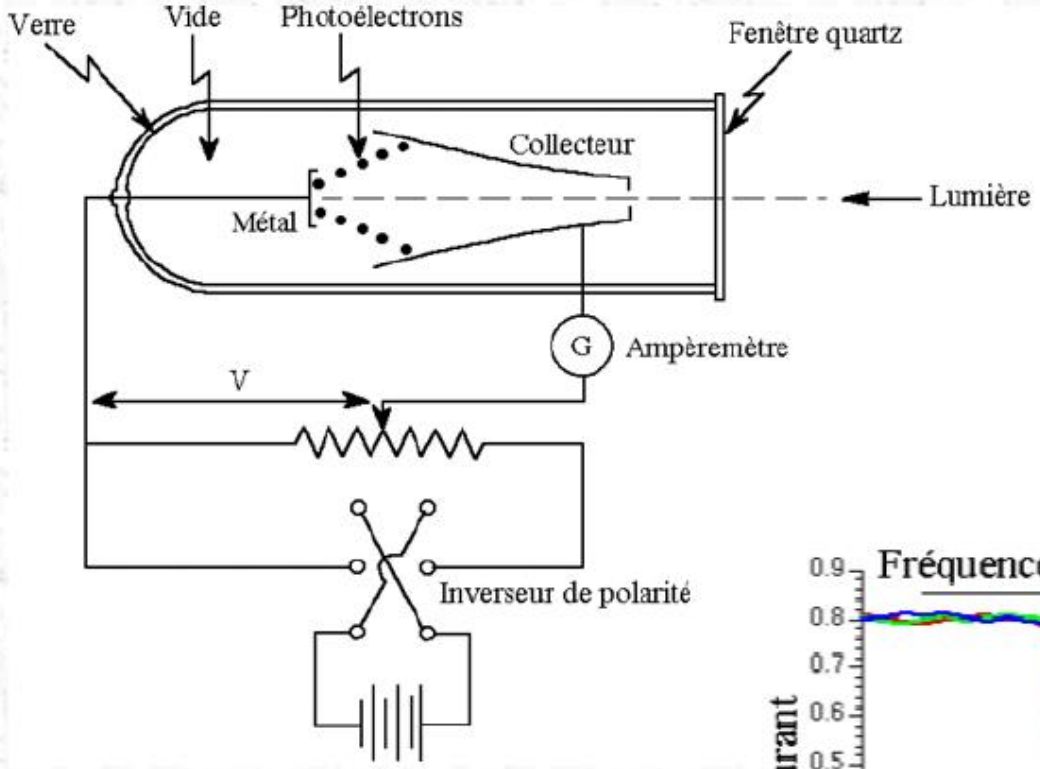
La microstructure de la lumière

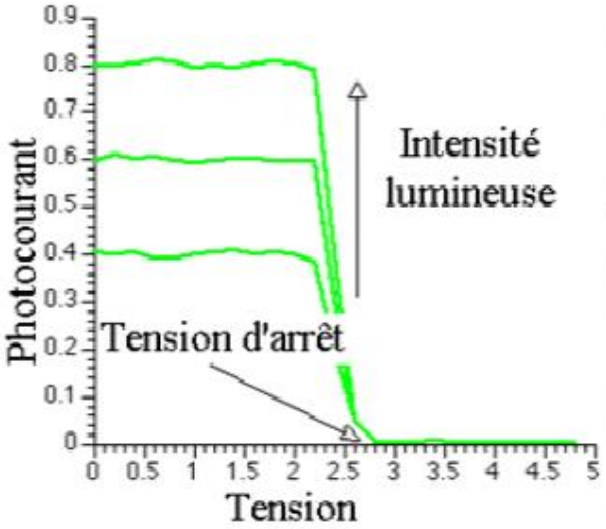
"Dès lors que l'entropie d'un rayonnement monochromatique dépend du volume de la même façon que s'il était un milieu discontinu consistant en quanta d'énergie de grandeur $h\nu$, le pas évident à franchir est d'investiguer si les lois de l'émission et de la transformation de la lumière sont telles qu'elles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

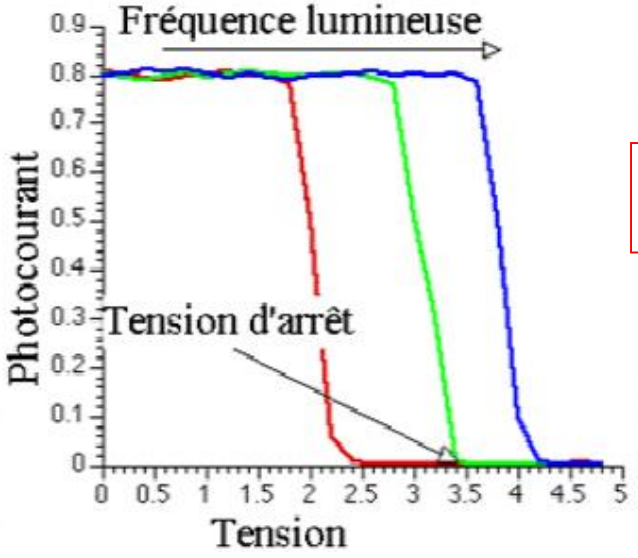
Einstein, Ann. D. Phys. 17, 132, 1905

Effet Photoélectrique

Seuil indépendant de l'intensité







$$T = h\nu - W_0$$

Effet photoélectrique et détermination de la valeur de *h* (1916)

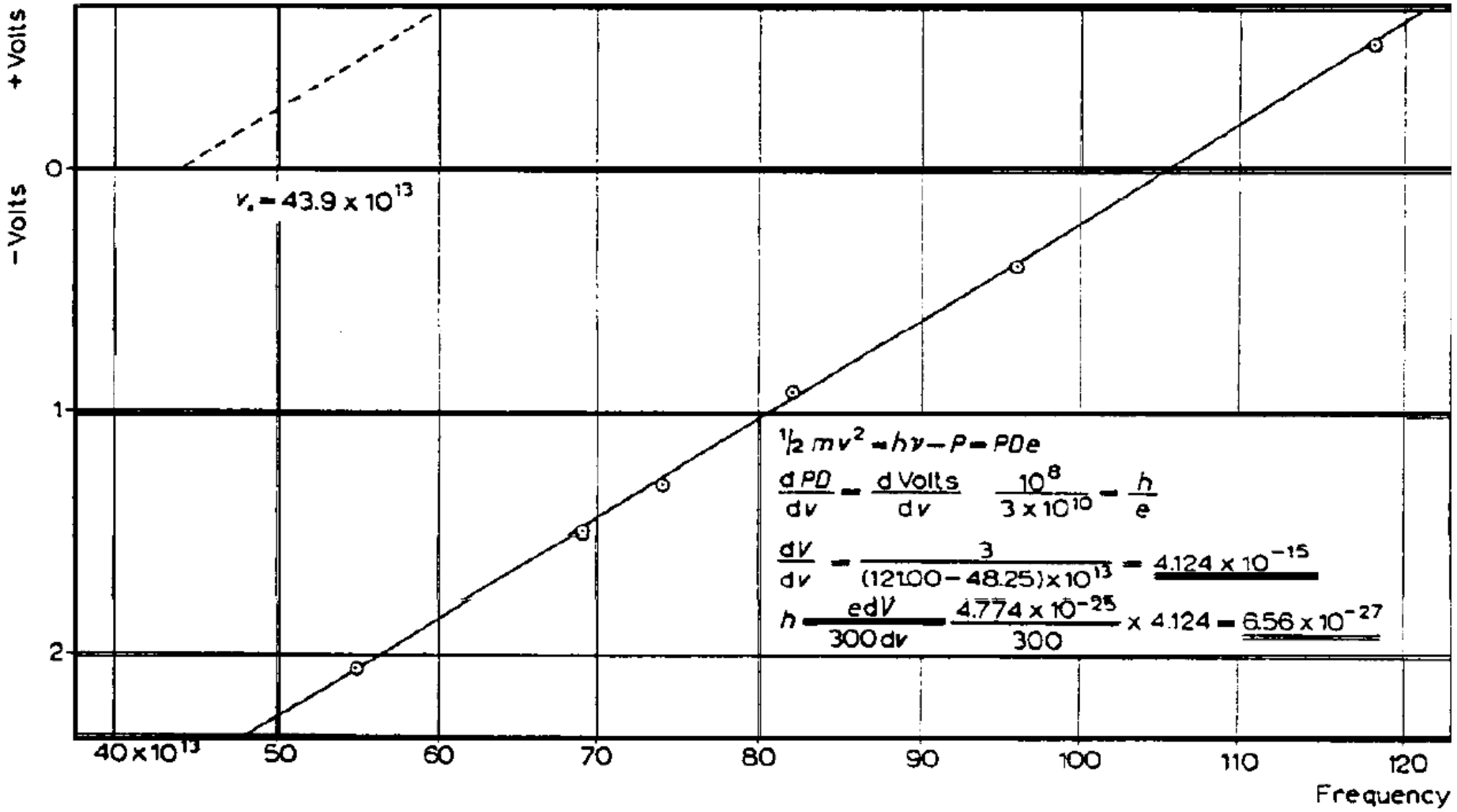
En 1916, Robert Millikan utilise un autre moyen pour déterminer *h*. Il vérifie expérimentalement la théorie de l'effet photoélectrique d'Einstein, en mesurant l'énergie cinétique du photoélectron émis en fonction de plusieurs fréquences *v*. Comme Einstein l'avait prévu, la relation entre ces deux grandeurs est linéaire, et la pente de la droite donne la valeur de *h*/*e*. Célèbre pour ses mesures de la charge de l'électron, en 1909, Millikan doutait de la validité de l'hypothèse des quanta de lumière, comme l'immense majorité des physiciens de l'époque. Une description corpusculaire des ondes électromagnétiques était si novatrice que, même après sa confirmation expérimentale par Millikan, l'idée des quanta de lumière mit plusieurs années à être acceptée.

$$T = h\nu - W_0$$

$$T = h\nu - W_0$$

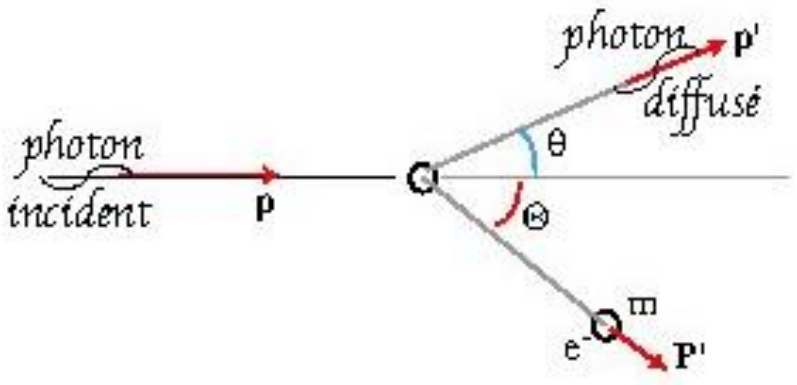
Millikan 1916

RO B E R T A. MI L L I K A NThe electron and the light-quant from the experimental point of view Nobel Lecture, May 23, 1924



Effet Compton (**1923**)

Arthur H. Compton



$$\overrightarrow{p} = \frac{h\nu}{c}$$

Conservation de la quantité de mouvement

Aspect *corpusculaire* de la lumière: quantité de mouvement $\overrightarrow{p} = \frac{h\nu}{c}$

Dualité Onde-Corpuscule II

- La dualité onde-corpuscule autour des constituants de la matière.
  - La nature ondulatoire de la matière: Louis De Broglie
  - L'onde électronique: confirmation de l'hypothèse de Louis de Broglie
  - 50 ans après, l'onde du neutron
  - Interférométrie atomique et moléculaire
  - Condensats de Bose-Einstein

Deuxième phase dans l'élaboration de la théorie quantique

1923-1930

Congrès Solvay 1911

(première phase) *Théorie du rayonnement et quanta*

Congrès Solvay 1927

(deuxième phase)

Electrons et photons

Picard Henriot Ehernfest Herzen de Donder Schrödinger Verschaffelt Pauli Heisenberg Fowler brillouin
Debye Knudsen Bragg Kramers Dirac Compton L. de Broglie Born Bohr
Langmuir Planck Mme Curie Lorentz Einstein Langevin Guye Wilson Richardson

ÉLECTRONS ET PHOTONS

RAPPORTS ET DISCUSSIONS

DU

CINQUIÈME CONSEIL DE PHYSIQUE

TENU A BRUXELLES DU 24 AU 29 OCTOBRE 1927

SOUS LES AUSPICES

DE L'INSTITUT INTERNATIONAL DE PHYSIQUE SOLVAY

Publiés par la Commission administrative de l'Institut.

PARIS

GAUTHIER-VILLARS ET Cie, ÉDITEURS

LIBRAIRES DU BUREAU DES LONGITUDES, DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE

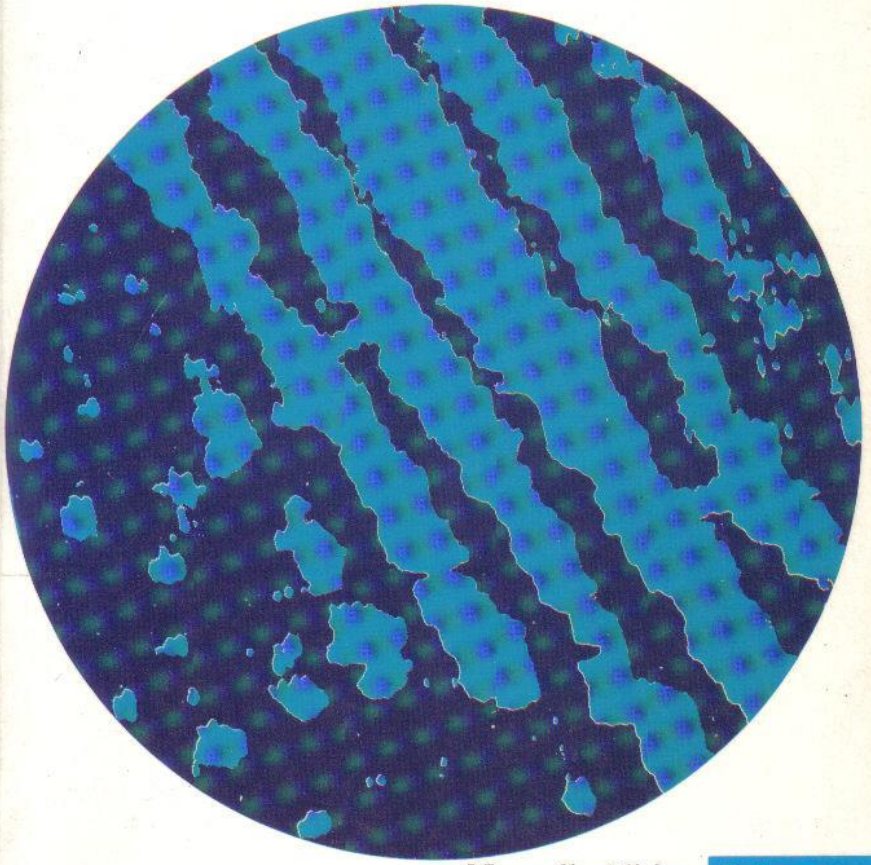
Quai des Grands-Augustins, 55.

1928

Banesh Hoffmann
Michel Paty

Points

L'étrange histoire des quanta



Nouvelle édition Sciences

Louis de Broglie (1892-1987)

Louis de Broglie (1892-1987)

Un duc au pays des quanta…

Issu d'une illustre famille, Louis de Broglie se destine d'abord aux disciplines littéraires. A 18 ans, il obtient une licence d'histoire. Puis il passe une année en droit et prépare un diplôme sur la politique française au début du XVIII^{e} siècle. Mais à 20 ans, il commence à s'intéresser aux sciences et il sera licencié ès sciences en deux ans. Pendant la Première Guerre mondiale, Louis de Broglie est affecté au poste radiotélégraphique de la tour Eiffel et peut se consacrer à ses recherches sur les ondes radioélectriques. Au sortir de la guerre, il rejoint son frère **Maurice** et l'aide dans ses travaux sur les rayons X. Ayant acquis de nombreuses connaissances pratiques, il se lance alors dans la théorisation.

5e mille

LES SAVANTS ET LE MONDE

COLLECTION DIRIGÉE PAR ANDRÉ GEORGE

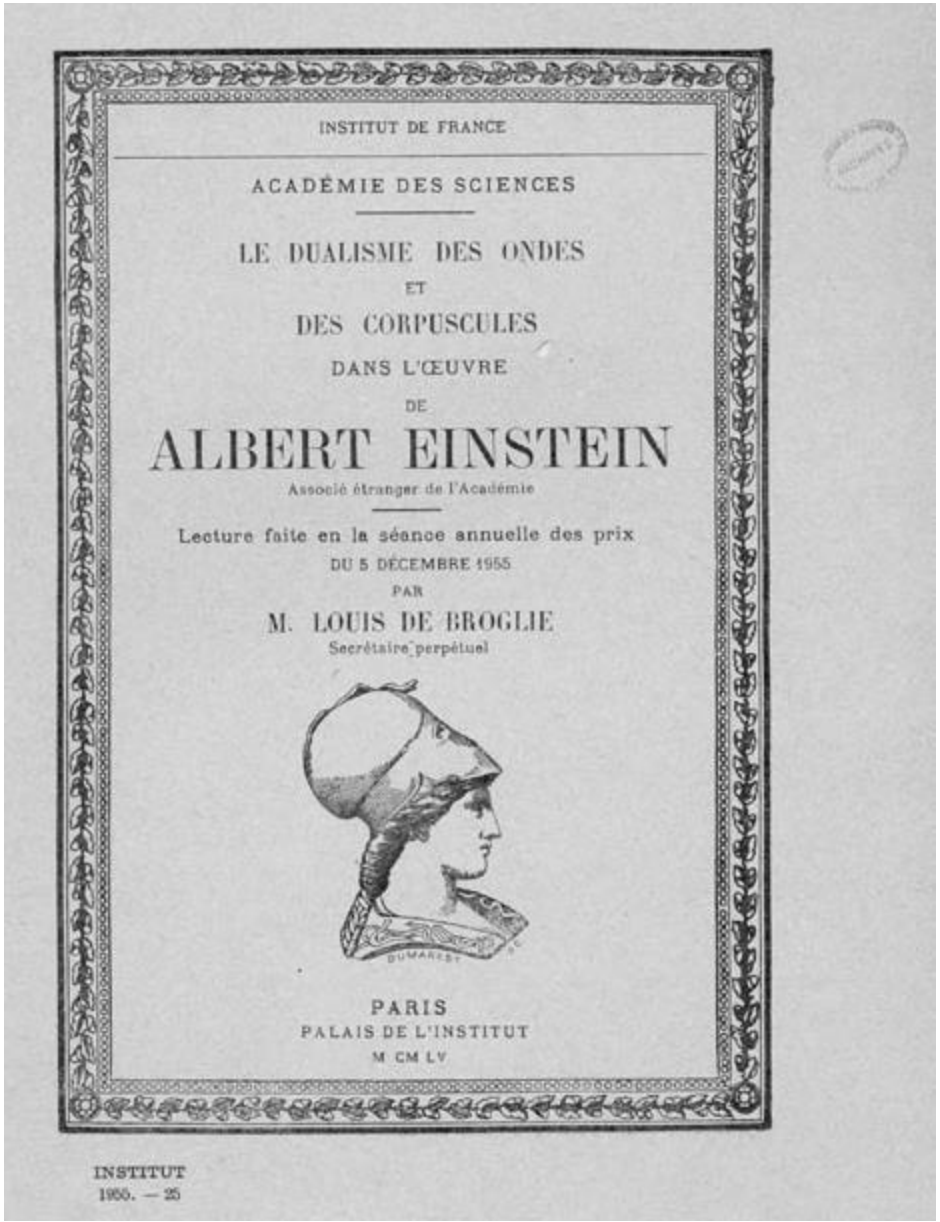
LOUIS DE BROGLIE

de l'Académie Française
Secrétaire Perpétuel de l'Académie des Sciences
Prix Nobel

SUR LES SENTIERS DE LA SCIENCE

ÉDITIONS ALBIN MICHEL

A. Einstein est mort en 1955



INSTITUT DE FRANCE

ACADÉMIE DES SCIENCES

LE DUALISME DES ONDES ET DES CORPUSCULES DANS L'ŒUVRE DE ALBERT EINSTEIN

Associé étranger de l'Académie

Lecture faite en la séance annuelle des prix
DU 5 DÉCEMBRE 1955
PAR

M. LOUIS DE BROGLIE
Secrétaire perpétuel

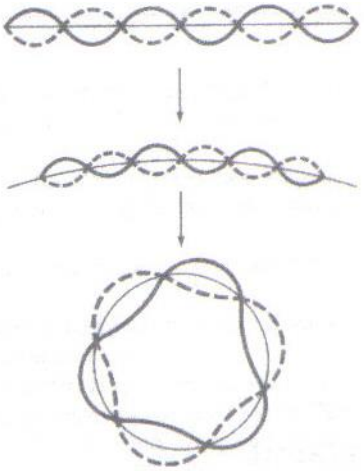
PARIS
PALAIS DE L'INSTITUT
M CM LV

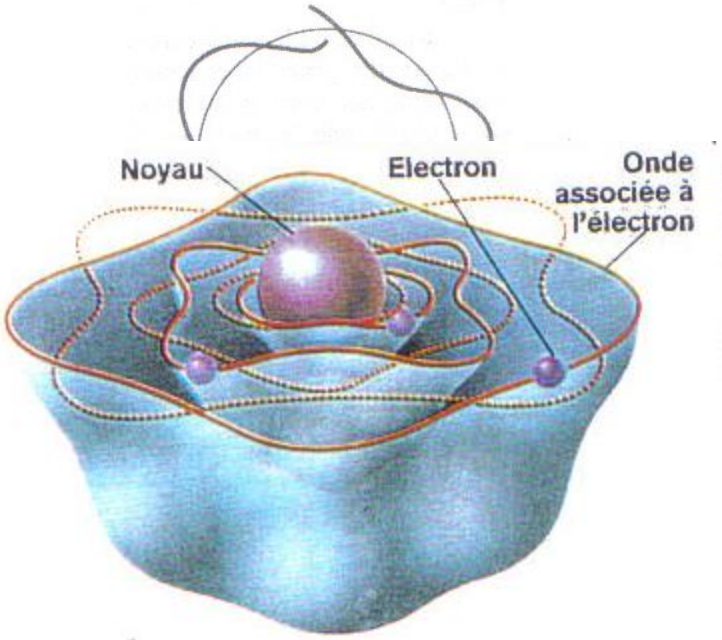
INSTITUT
1955. — 25

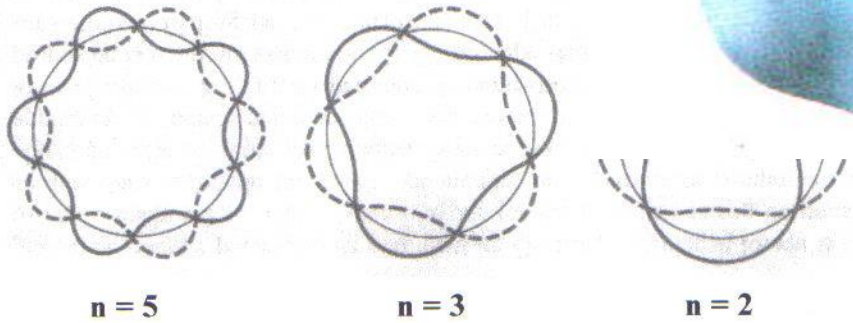
Onde stationnaire

ordinaire

circulaire







$$2\pi r_n = n\lambda \quad \text{avec} \quad \lambda = h/p \Rightarrow \oint \vec{p}\cdot d\vec{l} = nh$$

Mécanique ondulatoire

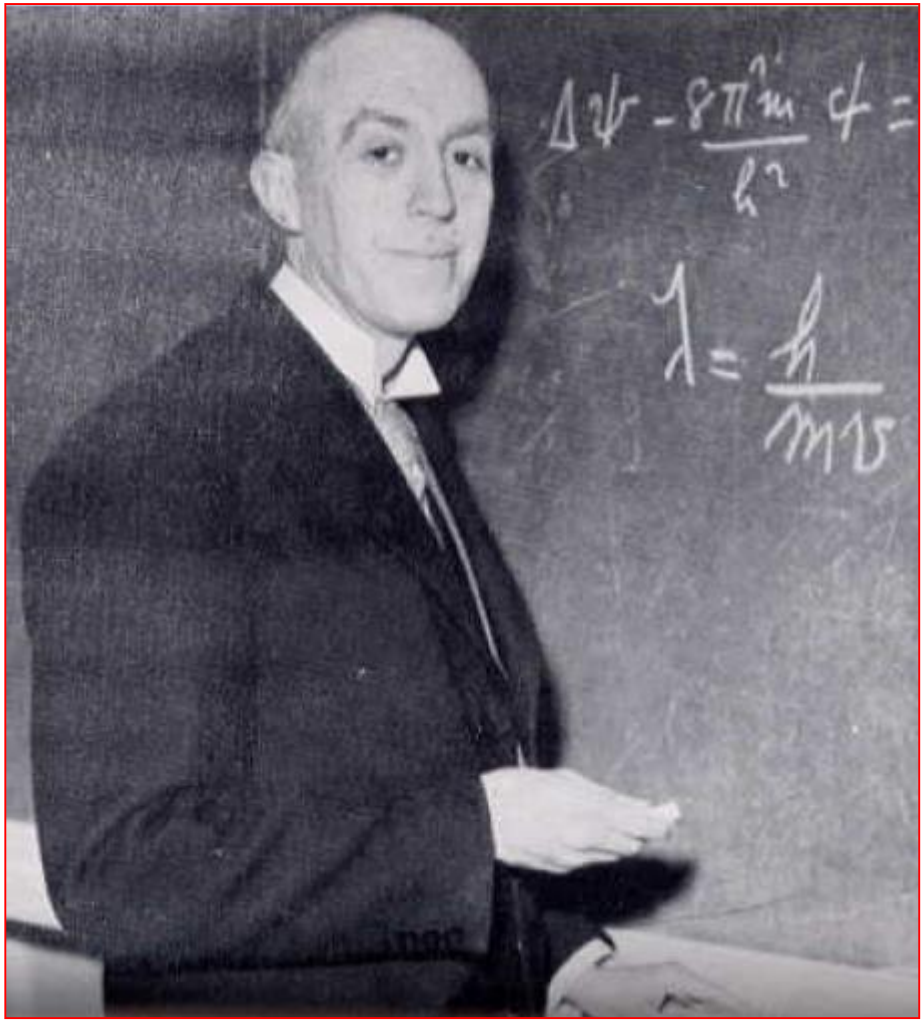
Quantification de l'action de Bohr

matière

onde

$$E = \hbar\omega$$

$$\overrightarrow{p} = \hbar\,\overrightarrow{k}$$



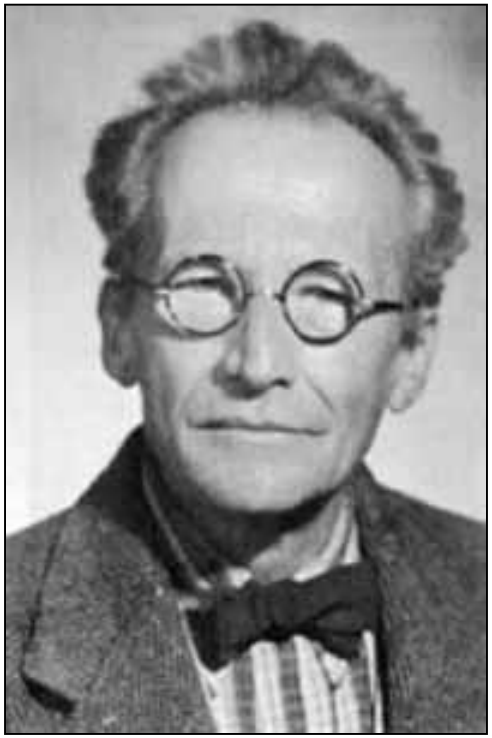
$$\lambda = \frac{h}{mv}$$

À toute particule de masse *m* on associe une onde de longueur d'onde λ

1924

1926

Erwin Schrödinger (1887-1961)

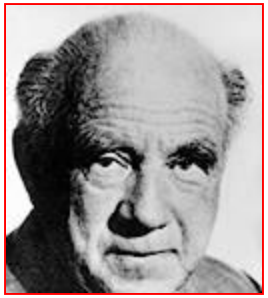


Équation d'onde

$$H\Psi = E\Psi$$

Werner Heisenberg (1901-1976)

mécanique des matrices (**1925**)



$$\Delta x \Delta p_x \geq \hbar/2$$

principe d'incertitude d'Heisenberg (**1927**)

Pauli

L'idée de beauté est par ailleurs fort subjective et ne peut donc servir de critère objectif. Un exemple ? En 1926, Erwin Schrödinger publie son équation et invite à considérer que les particules ne sont que des paquets d'onde. Dans le même temps, Werner Heisenberg publie sa mécanique des matrices, très abstraite, qui interdit qu'on puisse représenter les phénomènes quantiques dans l'espace-temps. Pendant plusieurs mois, les deux hommes ont des échanges aigres-doux. Schrödinger écrit à Lorentz que la **théorie de Heisenberg est « monstrueuse »**, Heisenberg écrit à Pauli que **la mécanique ondulatoire de Schrödinger est « abominable »**. Puis, aidés par Paul Dirac, l'un et l'autre finissent par se rendre compte que leurs théories, mathématiquement si différentes, étaient physiquement équivalentes (conduisaient aux même prédictions)… ! La laideur et la beauté peuvent donc avoir des masques interchangeables.

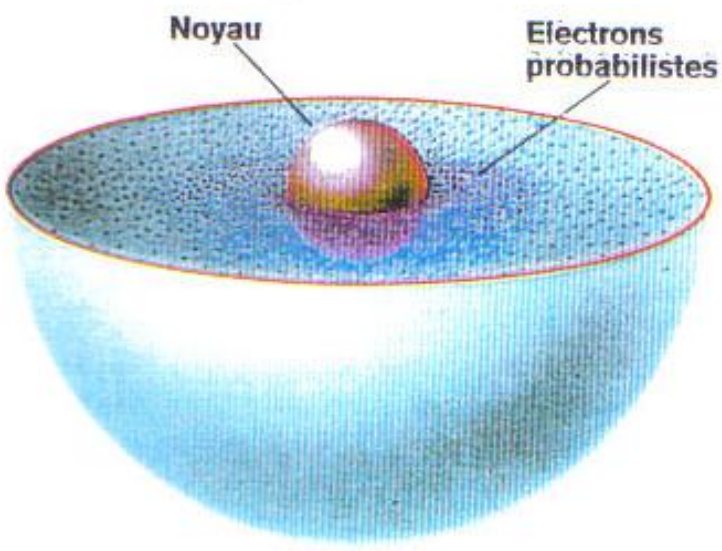
(Etienne Klein)

Lorentz

Modèle de Born (**1926**)

interprétation probabiliste de la fonction d'onde de Schrödinger

Max Born (1882-1970)



$$|\Psi(x,t)|^2 dx$$

Probabilité de trouver la particule au point *x* à l'instant *t*

Interprétation de l'école de Copenhague (Bohr)

Interprétation probabiliste de la mécanique quantique

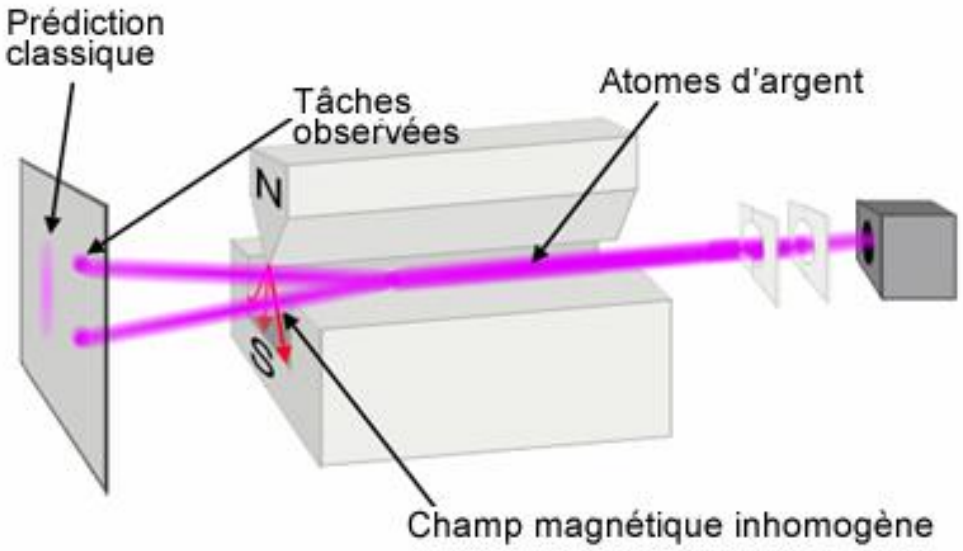
Jusqu'à l'année **1926**, « *la mécanique quantique, dans sa formulation ondulatoire (Schrödinger) ou matricielle (Heisenberg), était de la haute technologie mathématique de type nouveau, manifestement importante pour les réponses qu'elle donnait, mais sans principes physiques sous-jacents clairement affirmés* » (A. Pais).

Schrödinger proposa que l'on considérât les ondes comme la seule réalité; les particules seraient alors déduites des ondes. Juste après l'article de Schrödinger où il établissait l'équation de continuité, et reliait le **carré du module de la fonction d'onde à la densité de charge**, Max Born publia deux articles sur la mécanique quantique des collisions en **1926**: il y proposait que, dans le développement d'une fonction d'onde décrivant l'état d'un système suivant un ensemble d'états propres distincts non-dégénérés, *le carré du module du coefficient c_n d'un état ψ_n donne la probabilité pour que le système se trouve, lors d'une observation, dans cet état.* C'était la clé du problème. La solution définitive. Cette interprétation rencontra une grande résistance chez certains physiciens parmi les plus célèbres: **Einstein**, **Schrödinger**, **de Broglie**. Pour de Broglie, l'onde associée à une particule était comme une onde pilote, une conception qu'Einstein avait déjà formulée en affirmant, à propos de **la** dualité onde-corpuscule, que les ondes électromagnétiques n'étaient là que pour indiquer le chemin aux photons et déterminer la probabilité pour que le photon suive un certain chemin. Cette conception, néanmoins, ne fut ni reprise ni défendue par Einstein qui répugnait à donner à notre connaissance une base probabiliste: *« Le seigneur ne joue pas aux dés »*.

Extrait de *Sources et évolution de la physique quantique*

Expérience de Stern et Gerlach (1925)

Walter Gerlach (1889-1979)



Otto Stern (1888-1969)

Expérience Stern-Gerlach : des atomes d'argent, pourvus d'un moment magnétique (spin uniquement), traversent un champ magnétique inhomogène, ils sont déviés et laissent sur l'écran deux petites tâches symétriques. On s'attendait à ce que le moment magnétique prenne des valeurs continues et laisse donc sur l'écran une seule tâche allongée.

Otto Stern (1888-1969), physicien allemand, professeur à l'Université de Hambourg, à l'Institut de Technologie de Carnegie et à l'Université de Berkeley. Il utilise les faisceaux moléculaires pour mesurer les propriétés magnétiques des molécules et des protons et détermine ainsi les moments magnétiques de l'électron et du proton. Prix Nobel de physique en 1943.

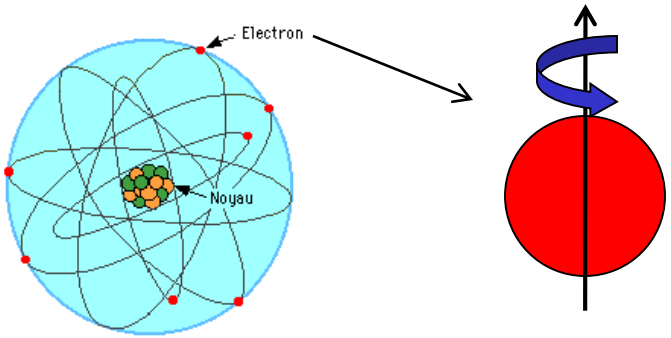
Walter Gerlach (1889-1979), physicien allemand, professeur aux universités de Tübingen et Munich. Il effectue avec Otto Stern l'expérience qui porte leurs noms et qui montre que le moment magnétique de l'électron ne prend que des valeurs discrètes. Il apporte aussi une contribution à la physique du rayonnement, à la spectroscopie et à la physique quantique.

Le spin de l'électron (1925)

W. Pauli et N. Bohr

Georg Uhlenbeck (1900-1988)

Samuel Goudsmith (1902-1978)



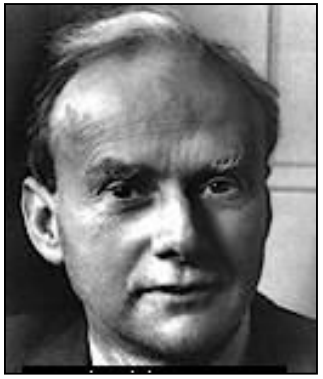
Pour expliquer ce résultat, **Georg Uhlenbeck** et **Samuel Goudsmith** proposent en 1925 une nouvelle hypothèse: les électrons sont pourvus de **spin**, sorte de mouvement de rotation autour de leur axe, et disposent donc d'un moment magnétique, comme l'aiguille d'une boussole. La projection du spin sur un axe ne prend pas de valeurs continues mais seulement deux valeurs qui sont multiples de la constante de Planck : +½ (spin up) et -½ (spin down). L'électron est alors une particule de spin ½.

$$s_z = \pm\frac{\hbar}{2}$$

Cette équation prend en compte de manière naturelle la notion de **spin** introduite peu de temps avant par **Georg Uhlenbeck** et **Walter Gerlach** et permit de prédire l'existence des **antiparticules**.

positron ⟷ ***électron***

Symétrie



Paul Adrien Maurice Dirac (1902-1984)

Pour lui la beauté des équations est un critère de validité de la théorie

1928

$$\left(i\gamma^{\mu}\partial_{\mu} - m_0\right)\Psi = 0$$

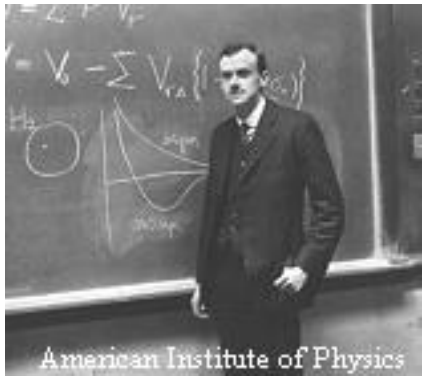
Extension relativiste de l'équation de Schrödinger

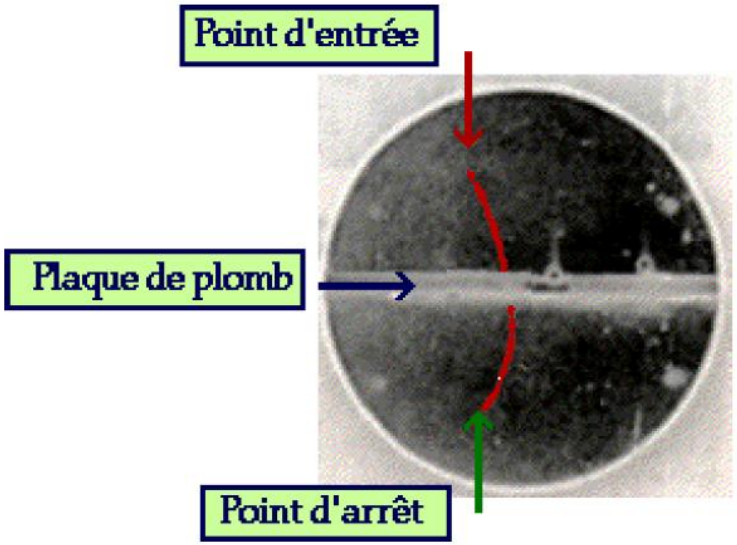
Niels Bohr

It seems reasonable to assume that not all the states of negative energy are occupied, but that there are a few vacancies or 'holes'. Such a hole would appear experimentally as a thing with +ve energy, since to make the hole disappear (i.e. to fill it up,) one would have to put −ve energy into it. Further, one can easily

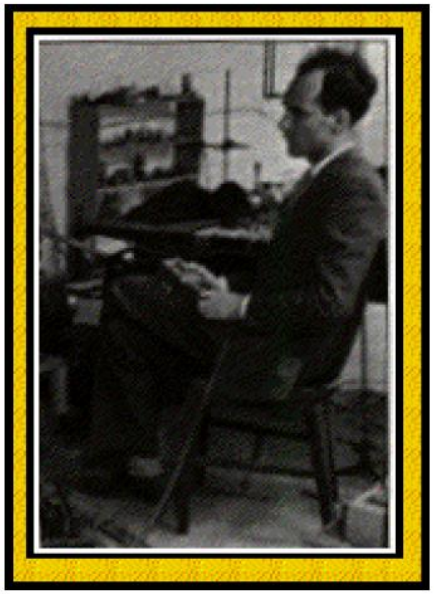
which can be described by a wave function, like an X ray orbit

- **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.





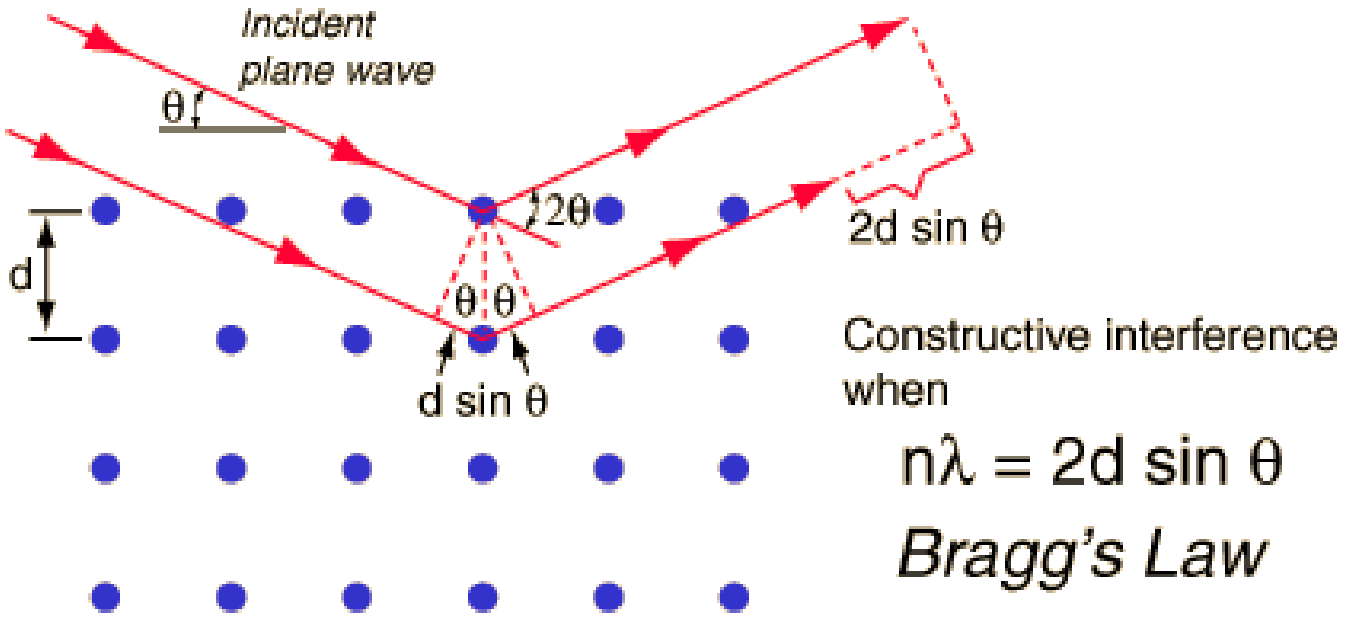
Le premier cliché d'Anderson



Carl Anderson (1905-1975)

La loi de Bragg (rayon X)

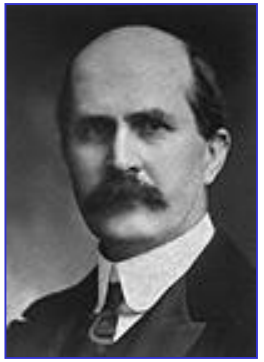
1912



Cette loi établit un lien entre la distance séparant les atomes d'un cristal et les angles sous lesquels sont dispersés des rayons X frappant le cristal.

Pour la première fois, on peut connaître la position exacte des atomes contenus dans les cristaux.

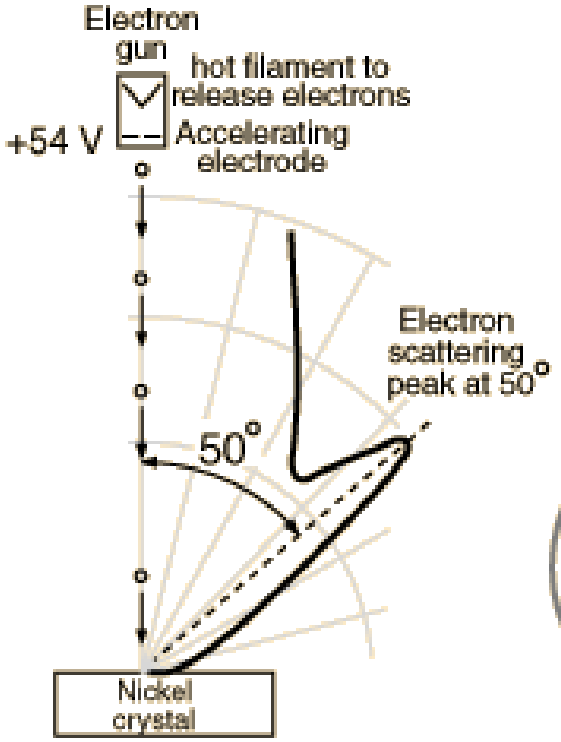
(1890-1971)



Son père

Lawrence Bragg découvre la loi dite « loi de Bragg » en **1912**, alors qu'il se trouvait au Trinity College à Cambridge. Cette loi établit un lien entre la distance séparant les atomes d'un cristal et les angles sous lesquels sont dispersés des rayons X frappant le cristal. En 1915, Lawrence Bragg et son père reçoivent le prix Nobel de physique pour leurs travaux sur la diffraction des rayons X. Ces travaux permettent de déterminer, pour la première fois, la position exacte des atomes contenus dans les cristaux, ce qui entraînera des progrès considérables dans différents domaines, en particulier en biologie moléculaire. En 1919, Lawrence Bragg succède à lord Ernest Rutherford en tant que professeur de physique à l'université de Manchester. Dans les années trente, Lawrence Bragg soutient les recherches de Max Ferdinand Perutz sur la structure des protéines globulaires. En 1937, il est nommé directeur du National Physical Laboratory et, en 1938, après le décès prématuré de Rutherford, il devient professeur de physique expérimentale à Cambridge. De 1954 à 1965, il dirige la Royal Institution à Londres. Il est anobli en 1941.

Davisson (1881-1958)



Theory

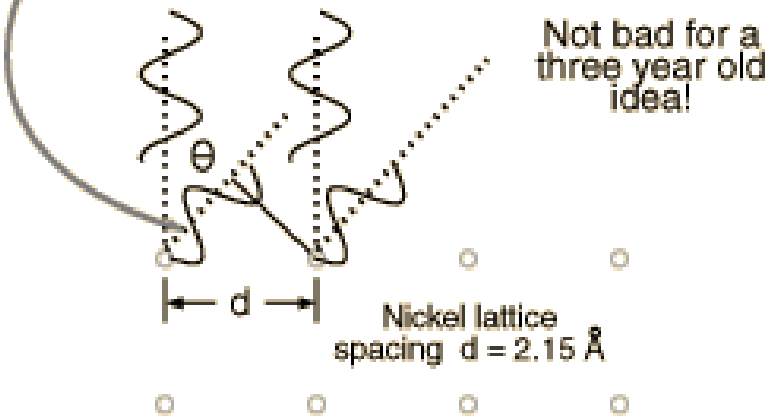
$\lambda = \frac{h}{mv} = 1.67$ Å for 54 V

Experiment

Pathlength difference

$d \sin\theta = 2.15 \sin 50^\circ = \lambda = 1.65$ Å

for constructive interference



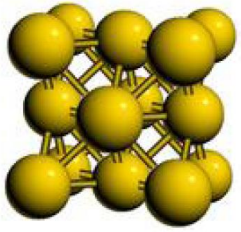
Not bad for a three year old idea!

1924 de Broglie's hypothesis

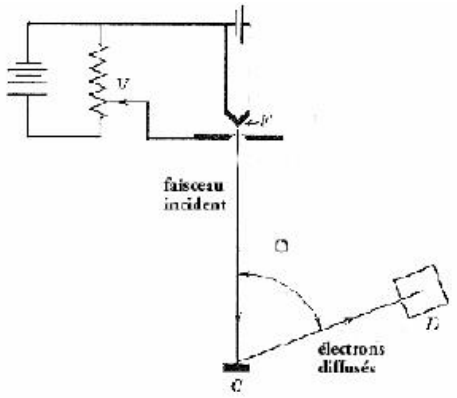
1927 Davisson-Germer experiment

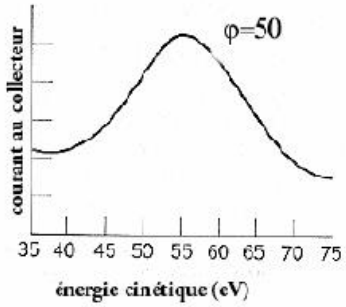
1929 Nobel Prize for de Broglie

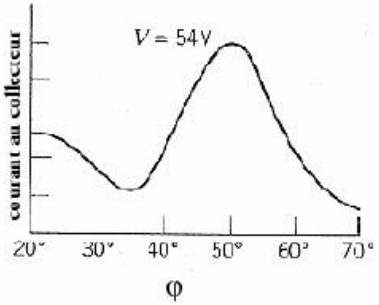
Expérience de Davisson-Germer (1927)



Structure cubique faces-centrées (comme le Nickel utilisé dans l'expérience de Davisson-Germer)



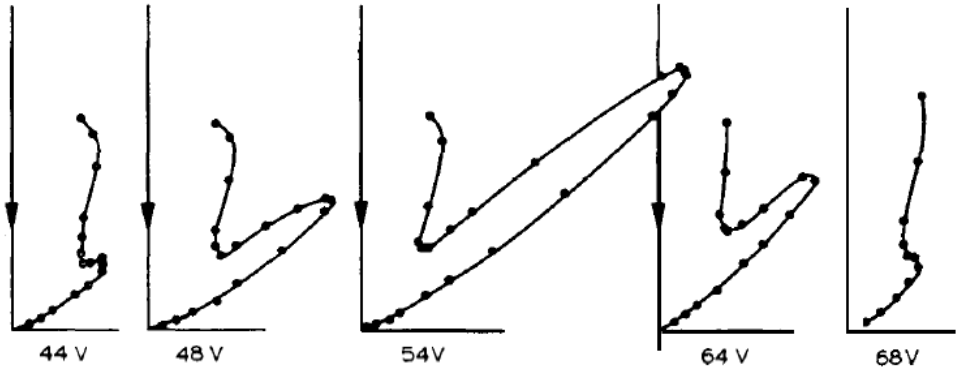




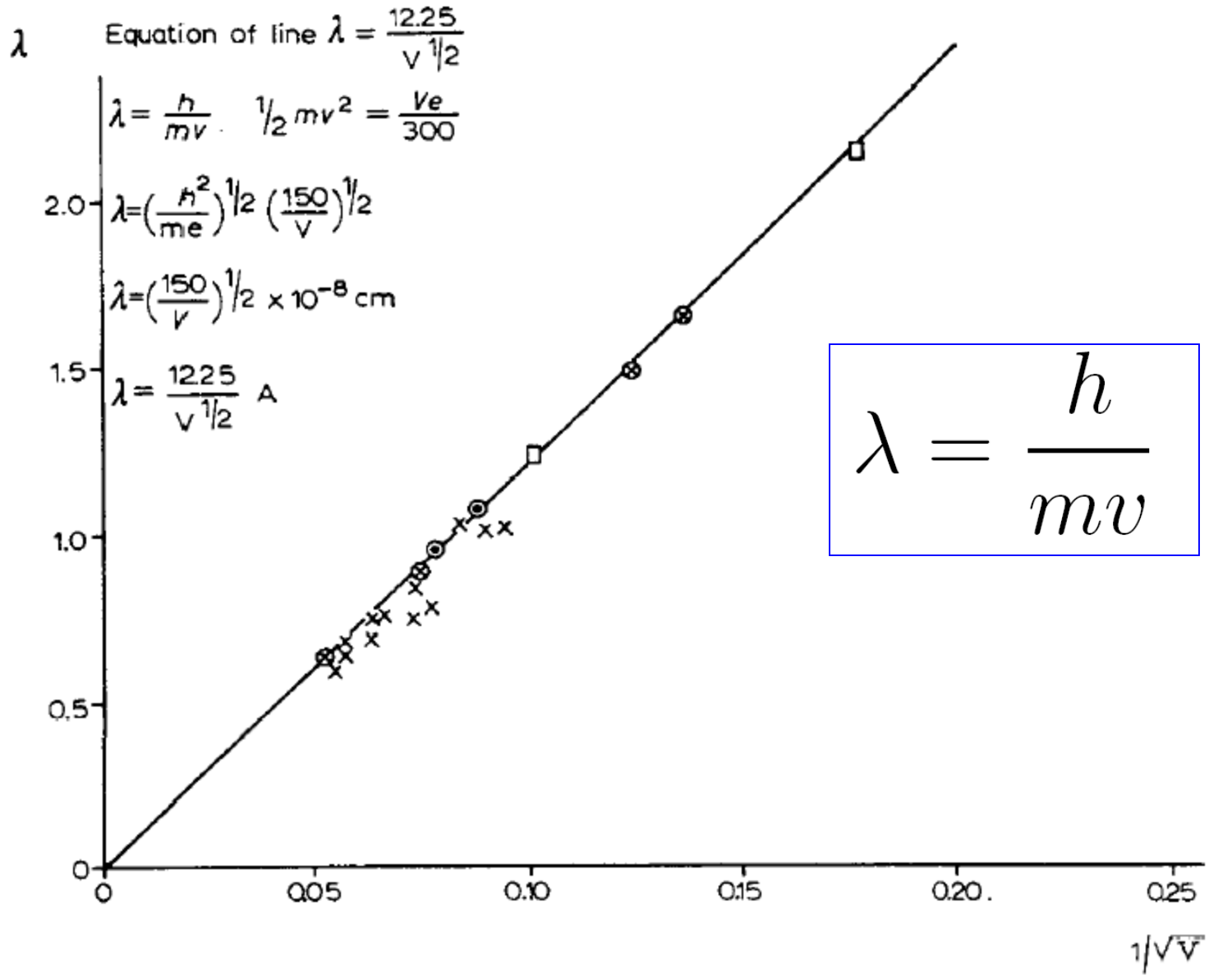
Lorsque l'énergie des électrons est fixée, on observe un maximum de diffraction à un certain angle.

Lorsque l'angle d'observation est fixé, on observe un maximum de diffraction pour une certaine énergie des électrons incidents.

On peut diminuer l'intensité du faisceau d'électrons pour n'envoyer qu'un seul électron à la fois sur le cristal.



Sur le site: Davisson-lecture.pdf



$$\lambda = \frac{h}{mv}$$

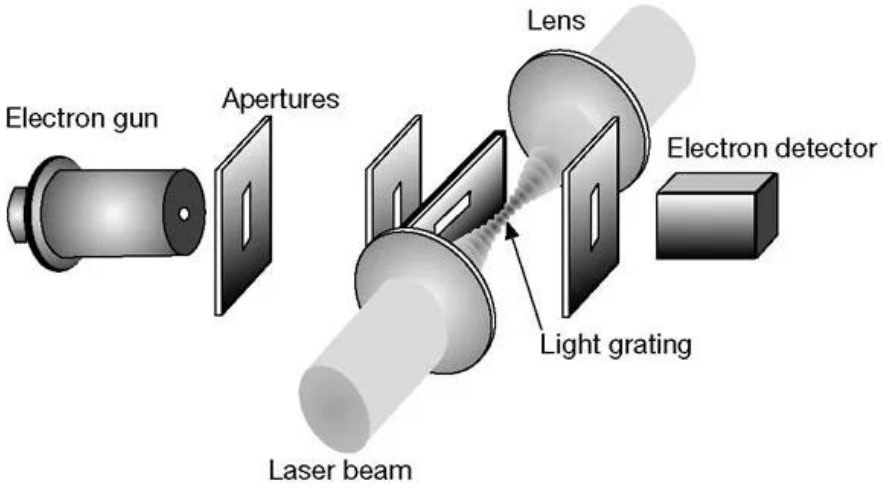
Vérification de la relation de de Broglie pour les électrons

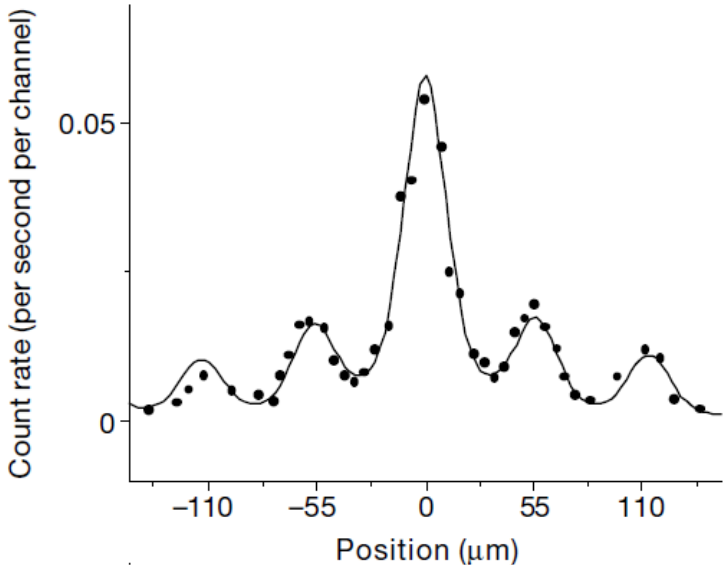
Kapitza-Dirac effect (1933)

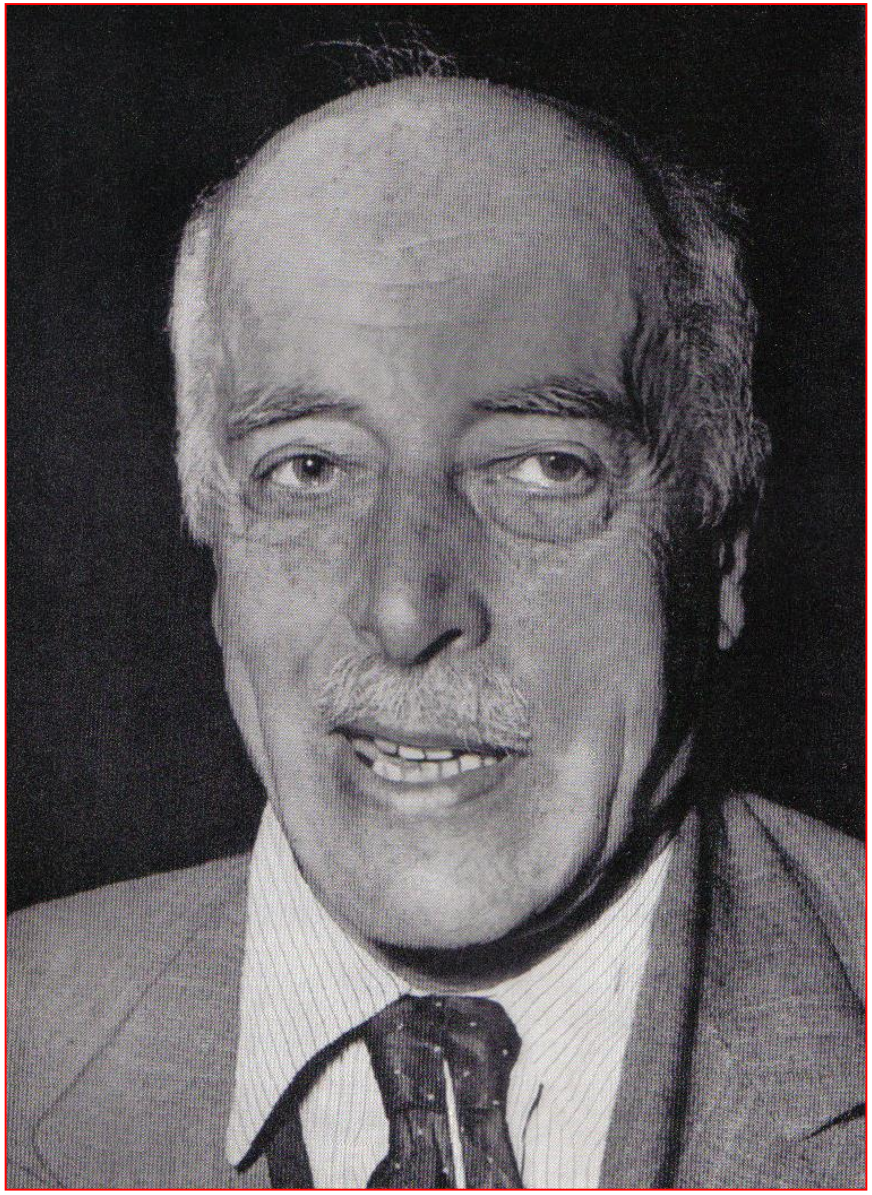
Predicted in 1933

Kapitza and Dirac predicted that electrons should also be diffracted by a standing light wave. This Kapitza-Dirac effect is analogous to the diffraction of light by a grating, but with the roles of the wave and matter reversed.

→ Observed in 2001





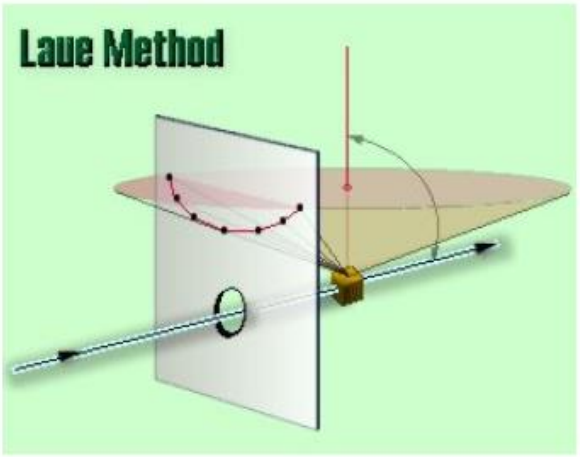


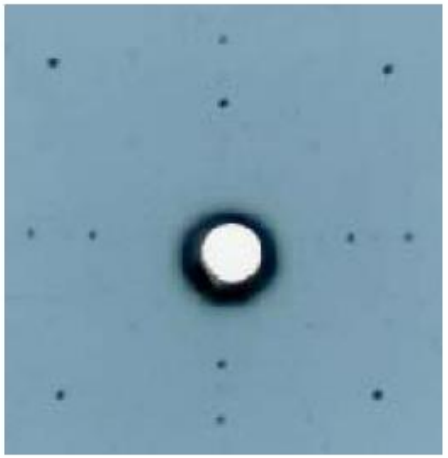
Max von Laue (1914)

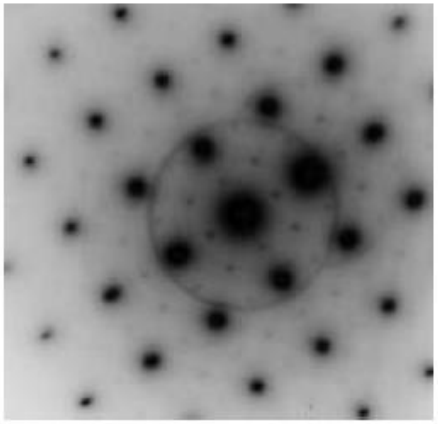
Motifs de diffraction de Laue avec des rayons X

"Back-reflection" Laue

- Dans cette méthode, le film photographique est placé entre la source de rayons-X et le cristal. Le faisceau qui est diffracté vers l'arrière du cristal est enregistré sur le film sous forme de spots (maxima de diffraction).
- On peut également observer la diffraction en transmission plutôt qu'en réflexion.
- La figure du bas donne à gauche donne un exemple de **diffraction des rayons-X** par un seul cristal de silicium. La longueur d'onde des photons est d'environ 0.1nm.
- La figure du bas à droite est une patron de **diffraction des électrons** sur un cristal (alliage de manganèse-nickel).





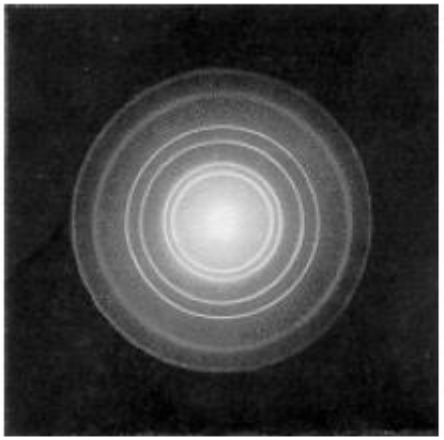


Rayons X Electrons

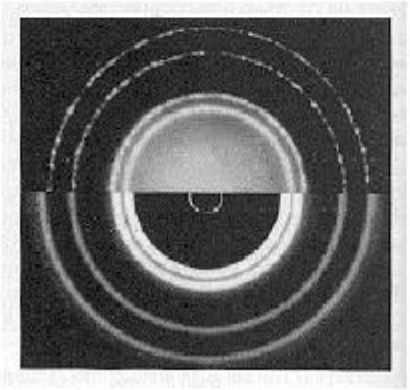
L'une des plus belles découvertes de la physique (A. Einstein)

Motifs de diffraction de Laue avec des électrons

Pour un cristal

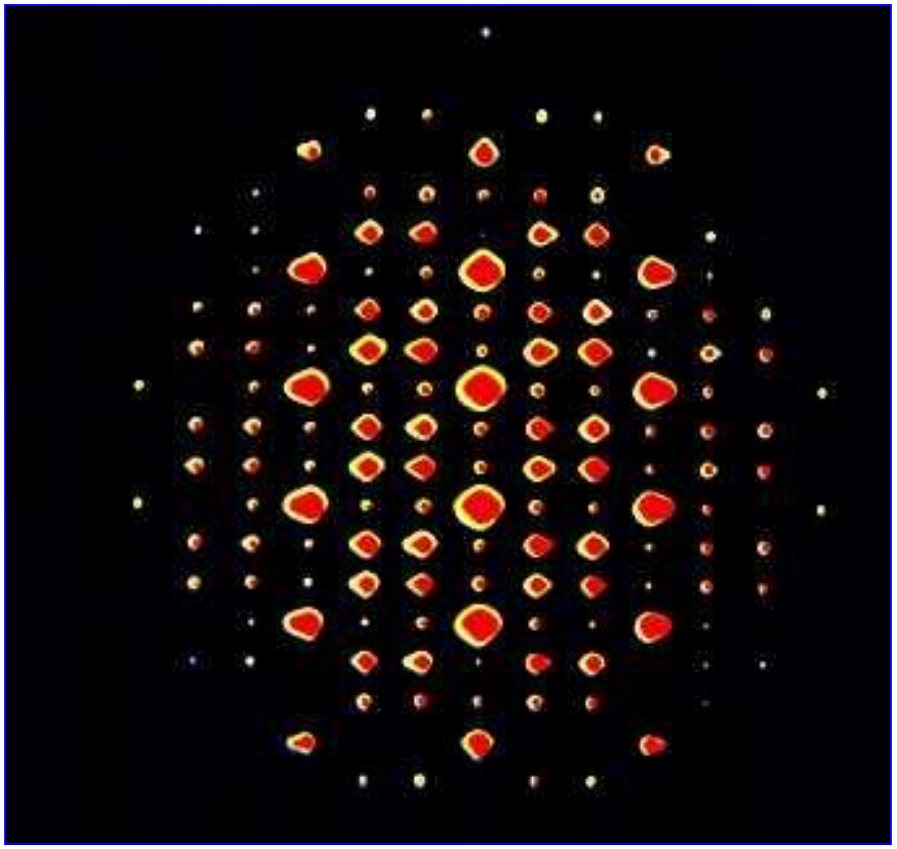


Pour une poudre



Comparaison entre patrons de diffraction (de Laue) pour électrons et REM!

L'électron est une onde!



Ce réseau de points a été obtenu en projetant un faisceau d'électrons sur un *alliage de titane et de nickel*. Le faisceau dispersé a ensuite été recueilli par un détecteur. On remarque que le réseau d'électrons n'est pas uniforme : il présente des zones à forte concentration d'électrons (points). Cette disparité est due à l'interférence d'ondes associées aux électrons. Par ailleurs, la dispersion du faisceau s'interprète comme une manifestation de la diffraction. **Ces deux phénomènes, interférence et diffraction, mettent en évidence le caractère ondulatoire des particules**.

En **1937**, **George Paget Thomson** partage le prix Nobel avec **Davisson**, pour son travail sur la diffraction des électrons. C'est le fils du découvreur de l'électron **Joseph John Thomson** qui reçut aussi le prix Nobel en **1906**.

Radioactivité artificielle et découverte du neutron (1932)

James Chadwick

$^{4}He + {}^{9}Be \rightarrow {}^{12}C + neutron$

Frédéric Joliot

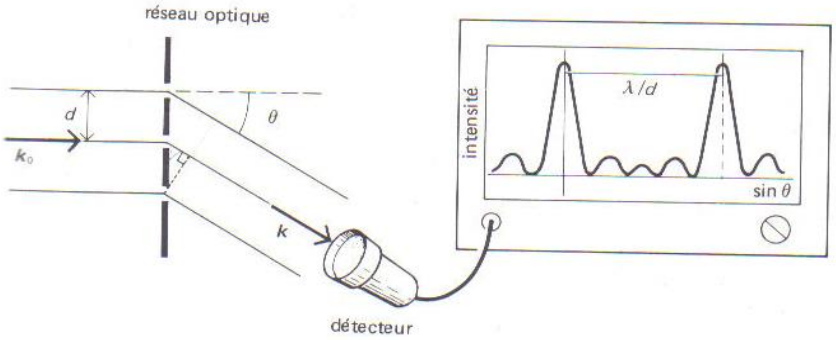
En 1930, les physiciens allemands **Bothe et Becker** ont bombardé un métal léger le béryllium avec des particules alpha et ont remarqué qu'un rayonnement très pénétrant était émis. Ce rayonnement n'étant pas ionisant, ils supposèrent qu'il s'agissait de rayons gamma.

En 1932, **Irène Curie** et **Frédéric Joliot** ont étudié ce rayonnement en France. Ils ont laissé ce rayonnement frapper un bloc de paraffine et ont constaté qu'il provoquait l'émission de protons par la cire. Ils ont mesuré la vitesse de ces protons et ont constaté que les rayons gamma devaient être incroyablement énergiques pour les faire sortir de la cire.

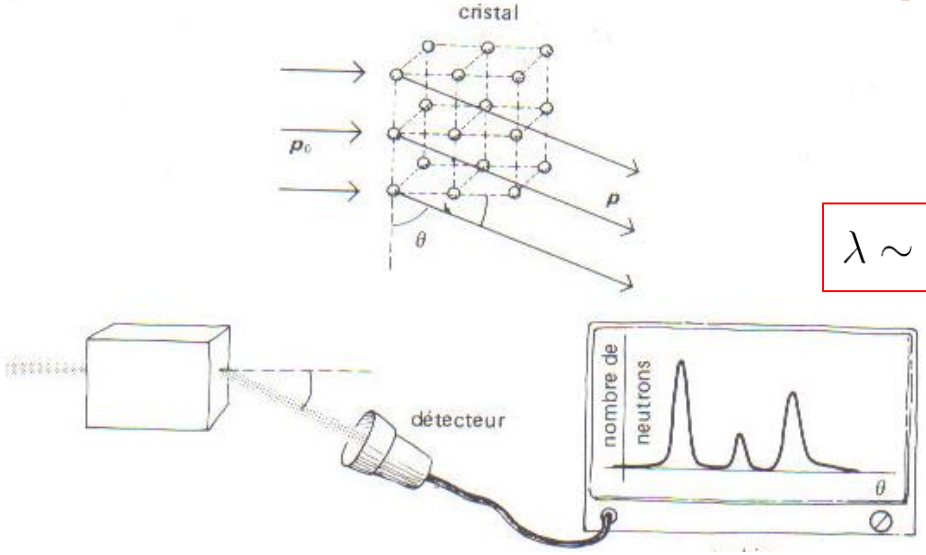
Chadwick rapporta l'expérience de **Joliot-Curie** à **Rutherford**, qui ne croyait pas que les rayons gamma puissent expliquer l'émission de protons de la cire. **Chadwick** et lui sont alors convaincus que le béryllium en fait émet des neutrons. Les neutrons ont presque la même masse que les protons, et devraient donc expulser assez facilement les protons d'un bloc de cire.

(*) Les chercheurs français dans les projets Manhattan et Tube Alloys, 1939-1945 par Hervé Delime (Unistra)

Le neutron est aussi une onde…



Interférence et diffraction de la lumière par un réseau optique



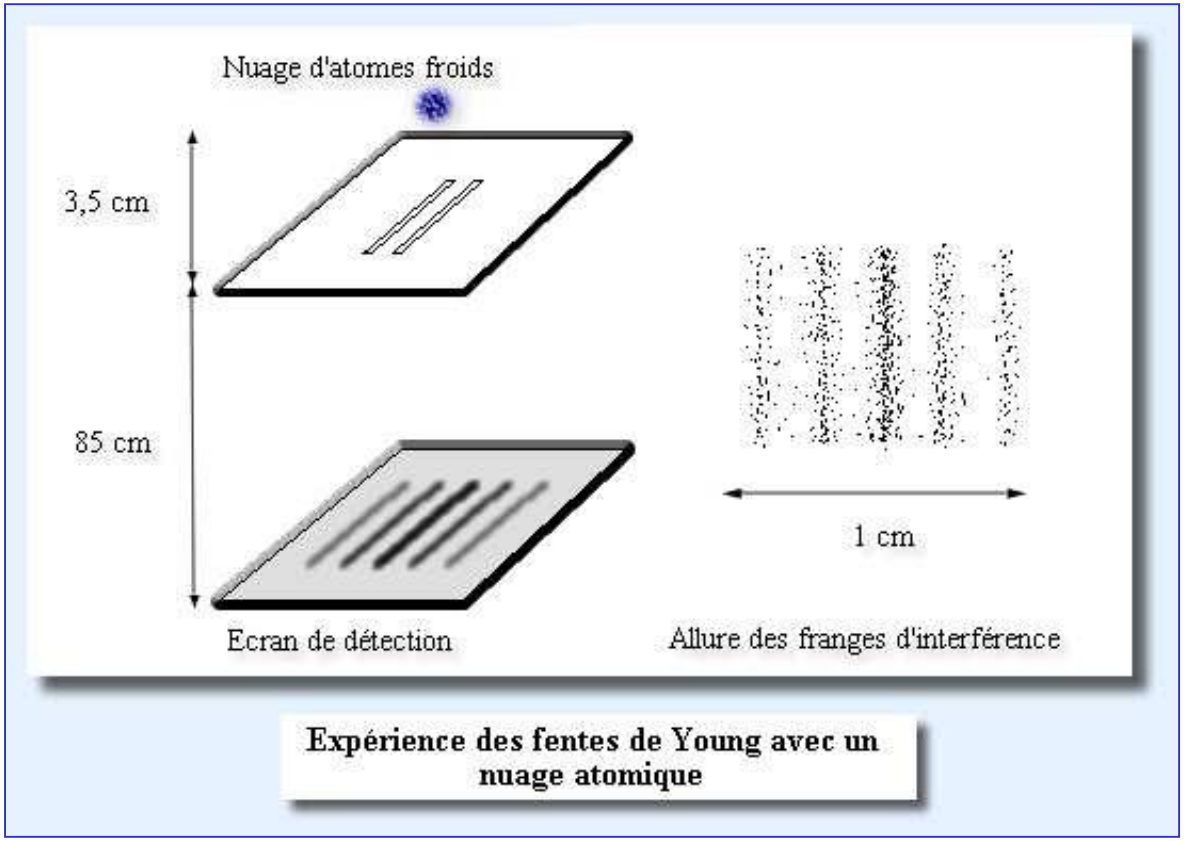
$$\lambda = \frac{h}{mv}$$

$$\lambda \sim \text{quelques Å} \longrightarrow E \sim 0.01\text{eV}$$

Interférence et diffraction des neutrons par un cristal

Dans les années 1970 (50 après de Broglie)

L’atome est aussi une onde…

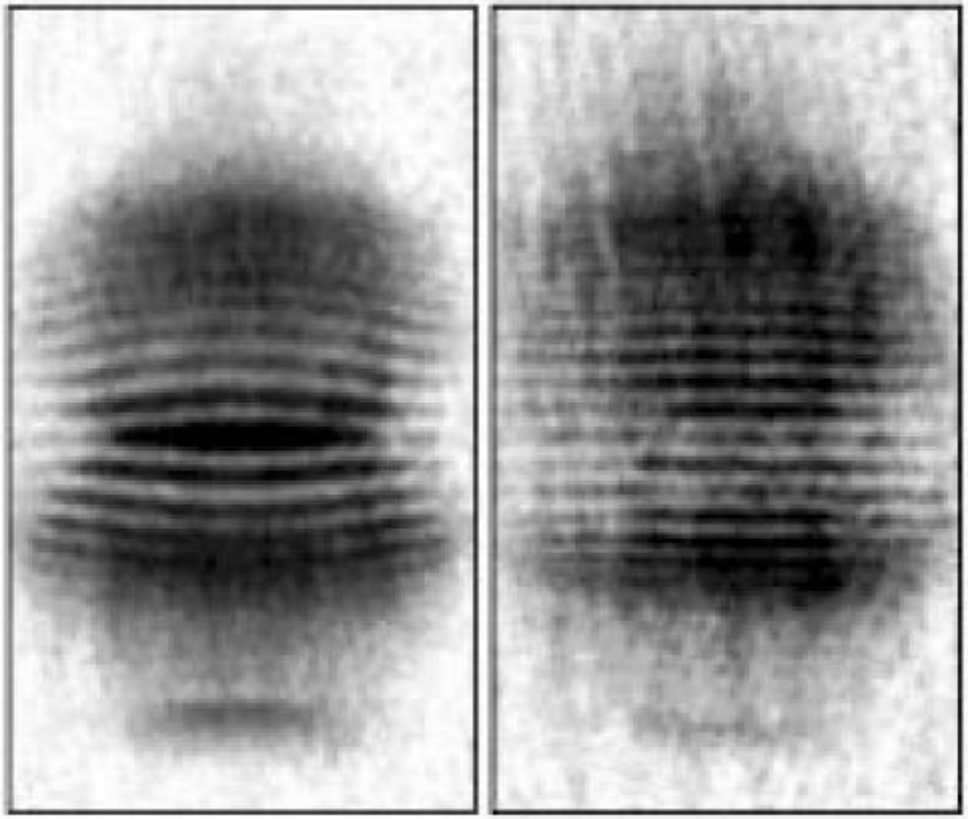


Expérience des fentes de Young avec un nuage atomique

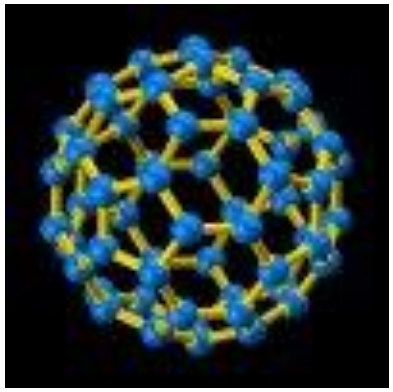
*Expérience d’interférences atomiques réalisée en **1992** par une équipe japonaise de l'université de Tokyo:*

Les atomes, immobilisés et refroidis, sont lâchés au-dessus des fentes ; ils tombent jusqu’à l’écran de détection, où chaque point noir correspond à l'impact d'un atome. La densité des impacts dessine une alternance de bandes sombres et claires : les franges d’interférence. La densité en un point de l’écran est proportionnelle à la probabilité qu’a un atome de se retrouver en ce point. Cette probabilité est elle-même proportionnelle au module carré $|A_1 + A_2|^2$ de la somme des amplitudes A_1 et A_2 des deux ondes atomiques évaluées en ce point.

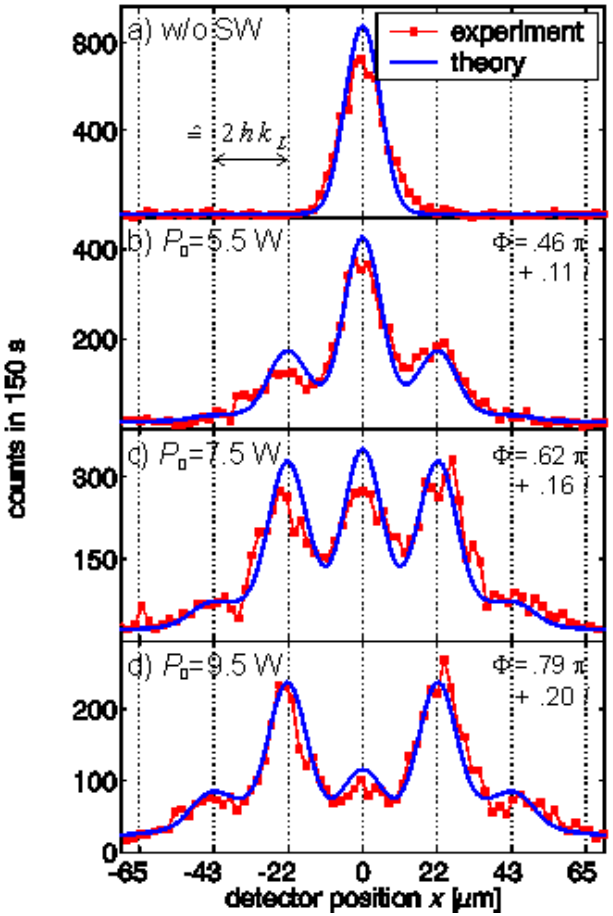
Interférences avec des atomes



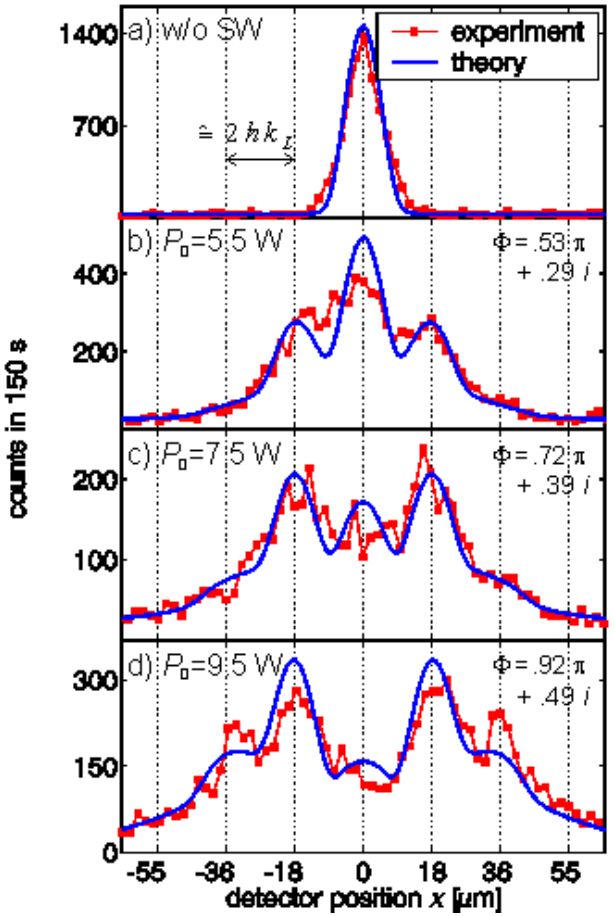
Une grosse molécule est aussi une onde…



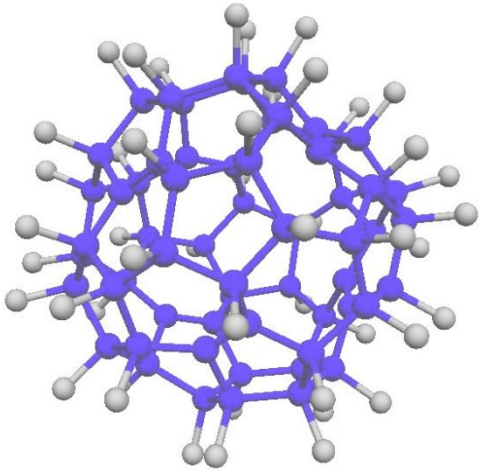
A. Zeilinger 1999



C_{60}

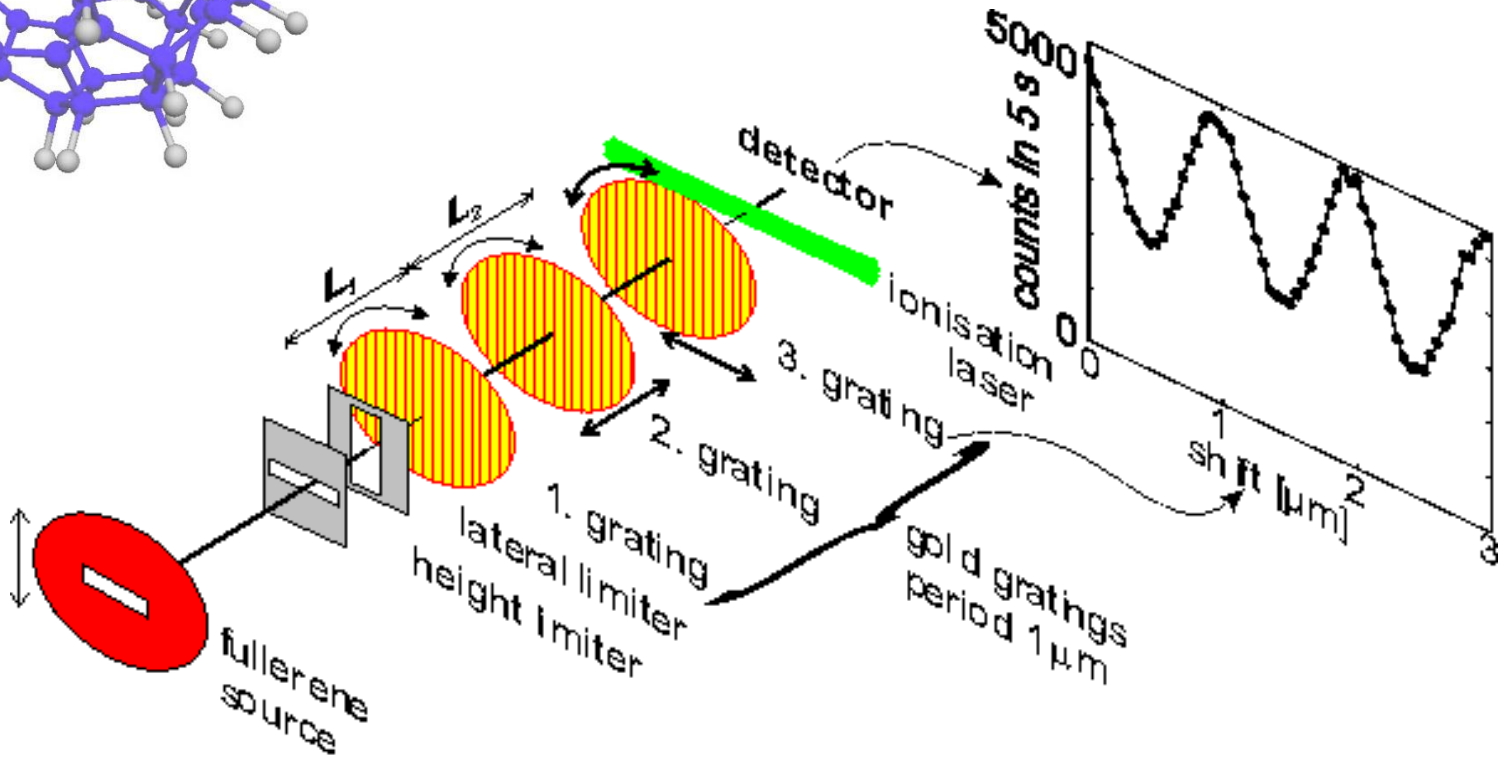


C_{70}



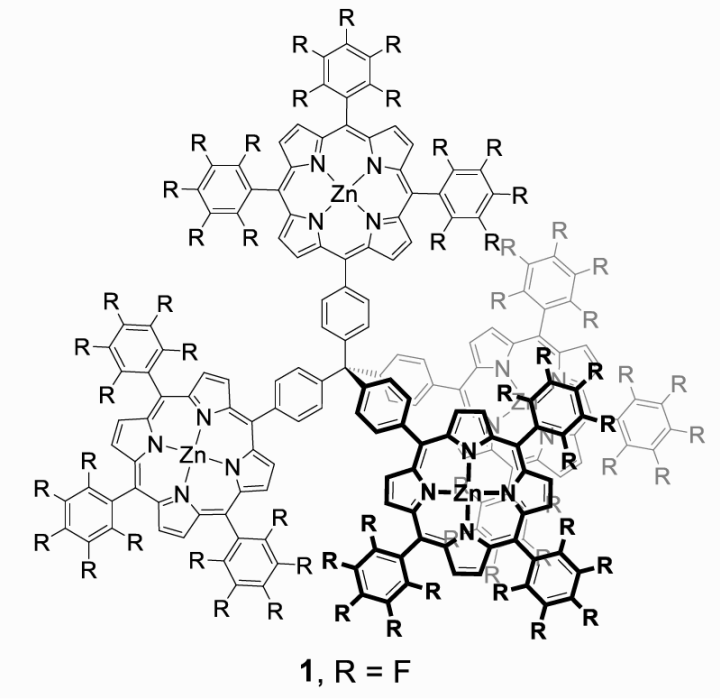
Fullerenes fluorés $C_{60}F_{48}$

108 atomes



2000 atoms in two places at once
A new record of quantum superposition

Date:
October 2, 2019
Source:
University of Vienna



Summary:

The quantum superposition principle has been tested on a scale as never before in a new study. Hot, complex molecules composed of nearly two thousand atoms were brought into a quantum superposition and made to interfere. By confirming this phenomenon -- 'the heart of quantum mechanics', in Richard Feynman's words -- on a new mass scale, improved constraints on alternative theories to quantum mechanics have been placed.