

Introduction au monde quantique : évolution des idées sur la lumière

La lumière, on en connaît un rayon depuis longtemps ...



La lumière, on en connaît un rayon depuis longtemps ...

Aménophis IV (Akhénaton), Néfertiti et leur fille
faisant une offrande à Aton, 1364-47 Avant J.C,
Bas relief, Palais Tell El-Armana



Xe siècle :

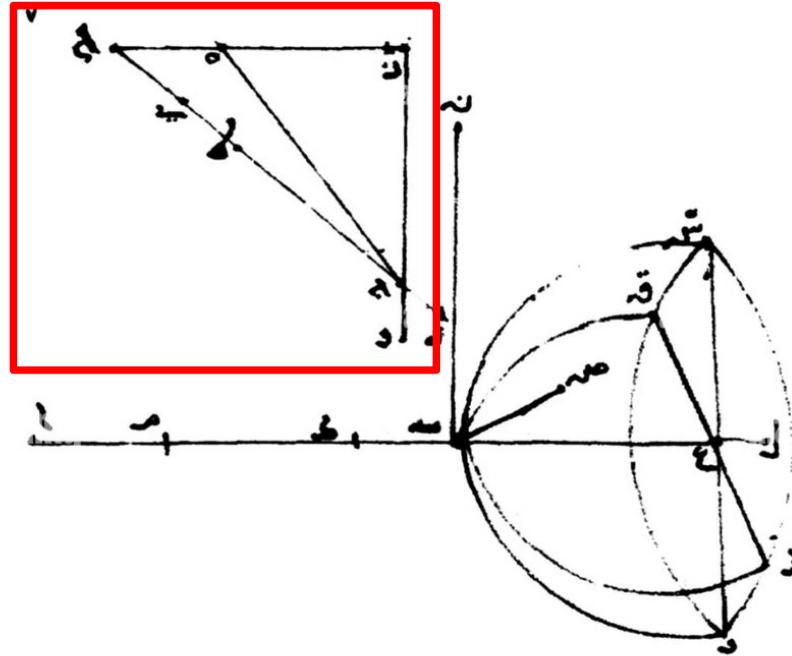
Optique géométrique

Réfraction : rayon lumineux



Xe siècle : Optique géométrique

Réfraction : rayon lumineux

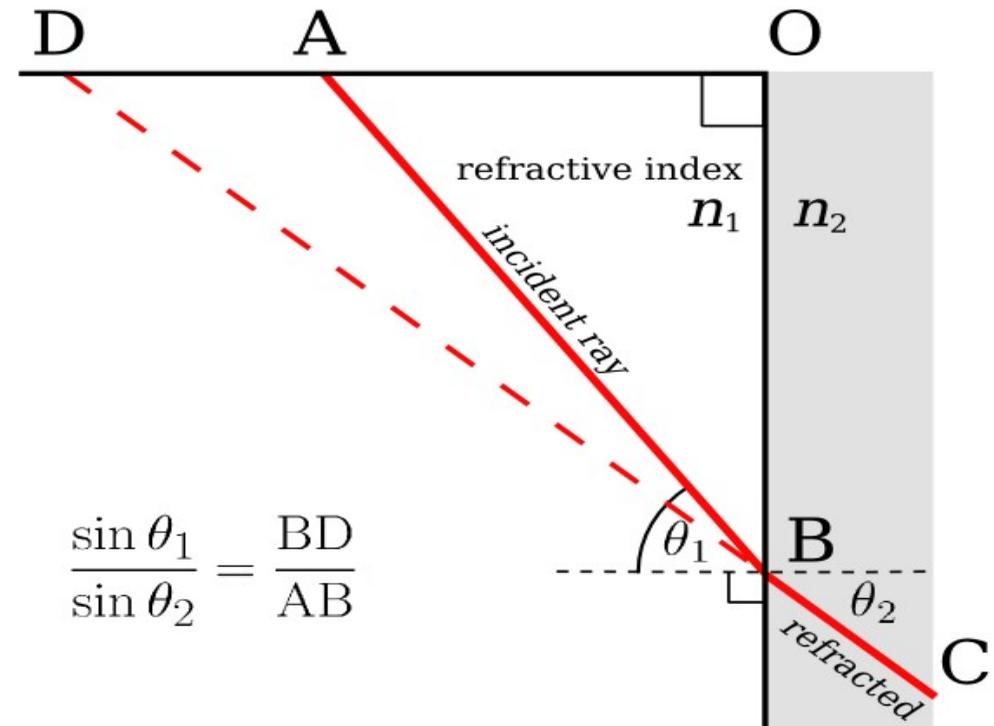
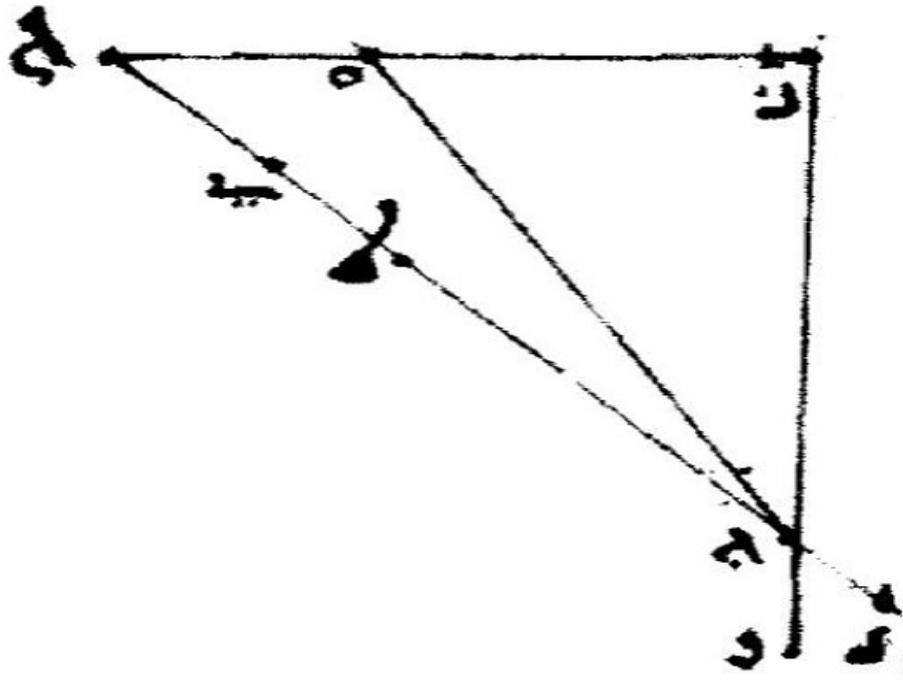


لانه ان ماتته عليها سطح مستوي غيره فلان هذا السطح يقطع سطح بزهر
على نقطة ب فلا بد من ان يقطع احد خطي ب ن بص فليكن ذلك
الخط بصر والفصل المشترك بين هذا السطح وبين سطح قطع ق ر
خط ب ش فلان هذا السطح يات من سيط ب على نقطة ب فخط
ب ش يقطع ق ب ر على نقطة ب وبذلك خط بصر وهذا حال
فلا يات من سيط ب على نقطة ب سطح مستوي غير سطح ب ن ص

Ibn Sahl, Bagdad (984 ap. JC)

Xe siècle : Optique géométrique

Réfraction : rayon lumineux



Loi de réfraction « mathématisée »:
Ibn Sahl, Bagdad (984 ap. JC)

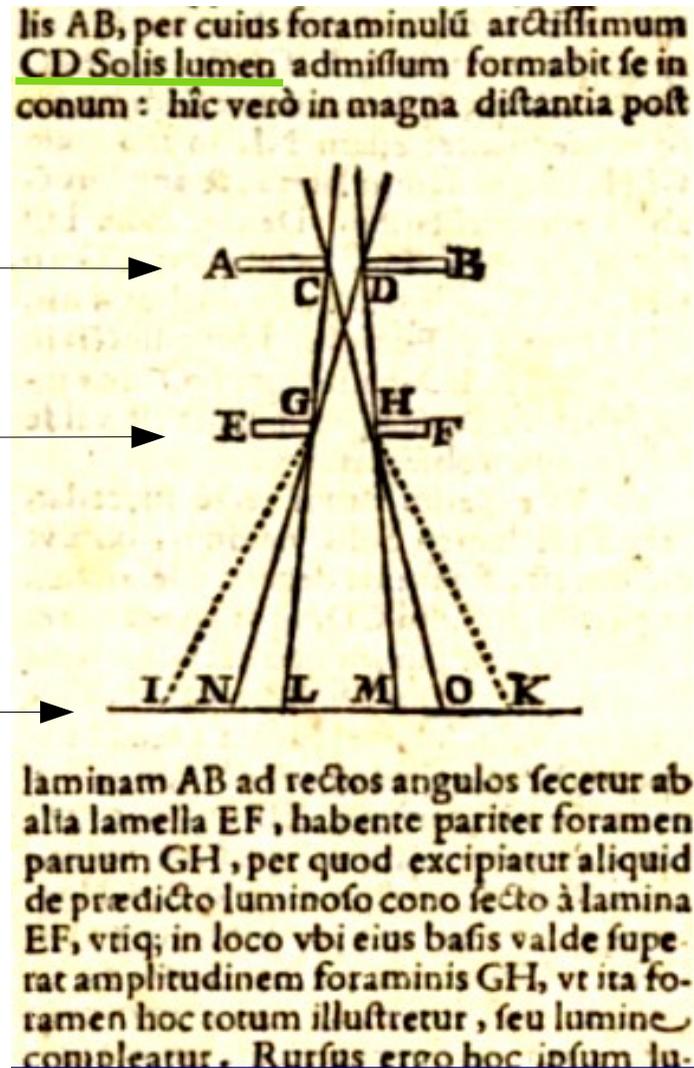
Le rayon mis en pièces : Diffraction

Observations par Grimaldi (~ 1665)

1^{re} ouverture
(volet)

2^e ouverture
(écran)

Écran d'observation



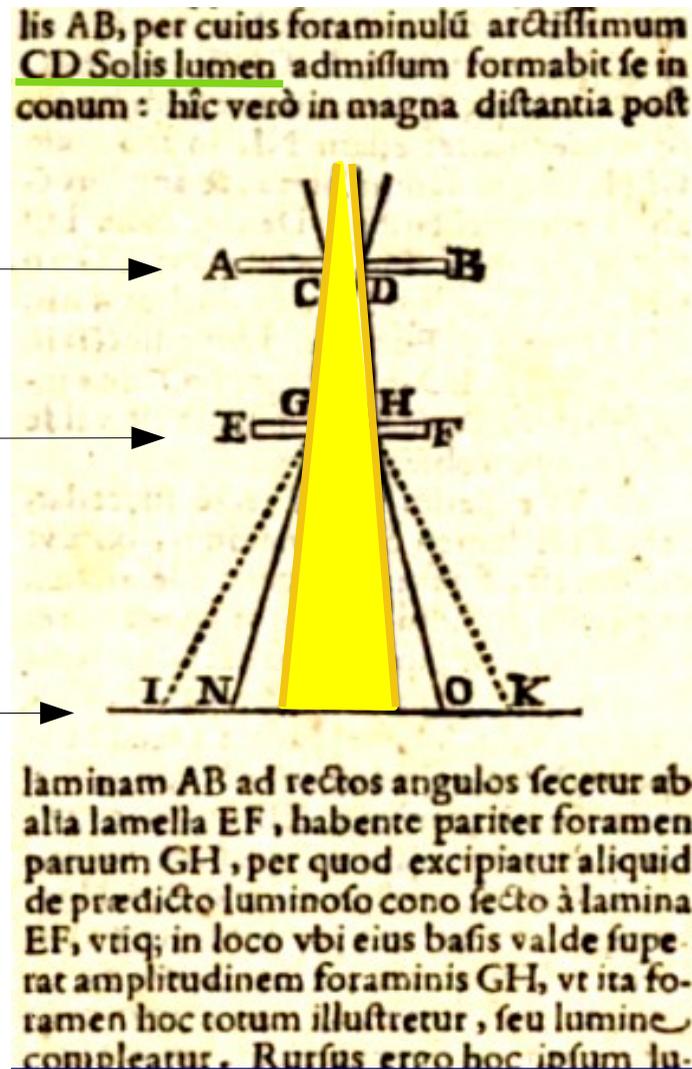
Le rayon mis en pièces : Diffraction

Observations par Grimaldi (~ 1665)

1^{re} ouverture
(volet)

2^e ouverture
(écran)

Écran d'observation



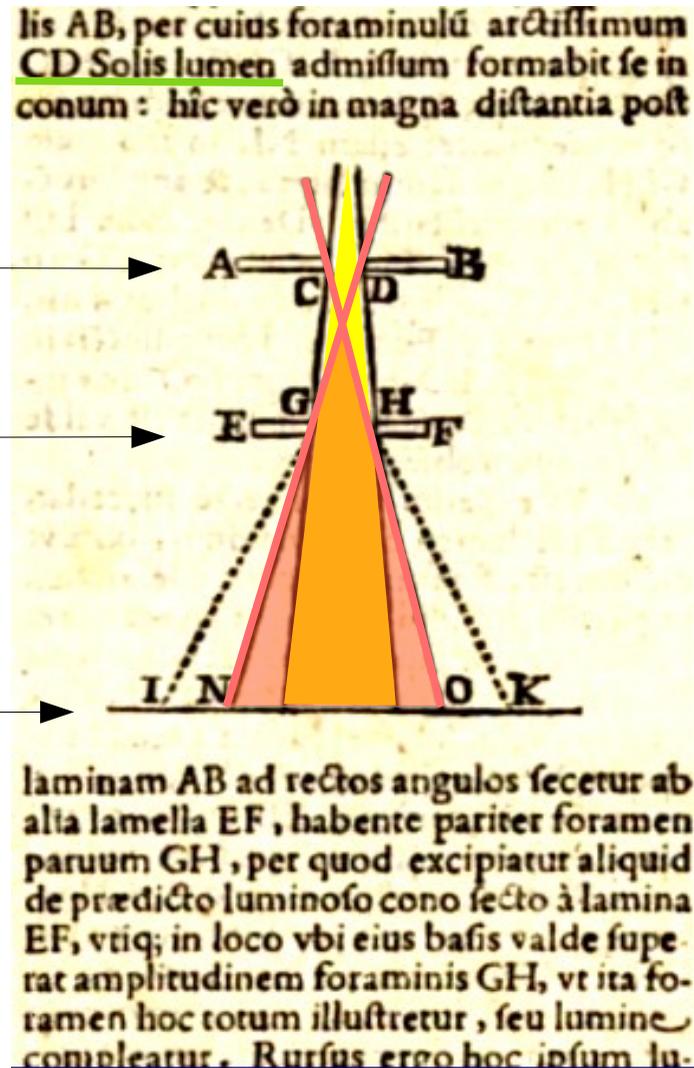
Le rayon mis en pièces : Diffraction

Observations par Grimaldi (~ 1665)

1^{re} ouverture
(volet)

2^e ouverture
(écran)

Écran d'observation



Le rayon mis en pièces : Diffraction

Observations par Grimaldi (~ 1665)

1^{re} ouverture
(volet)

2^e ouverture
(écran)

Écran d'observation

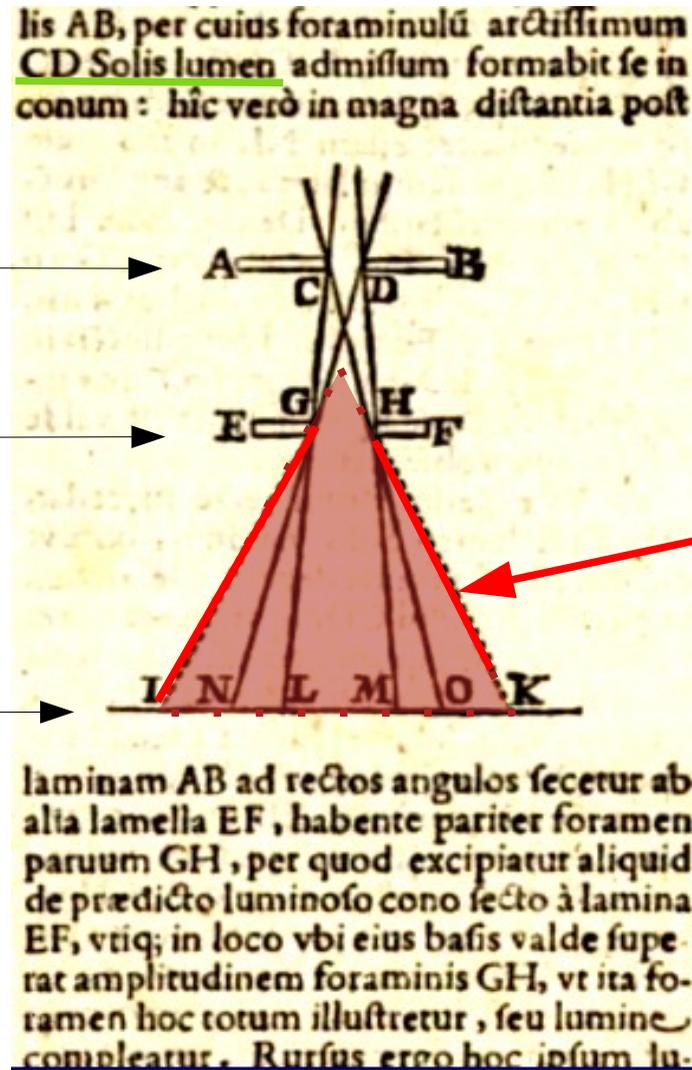
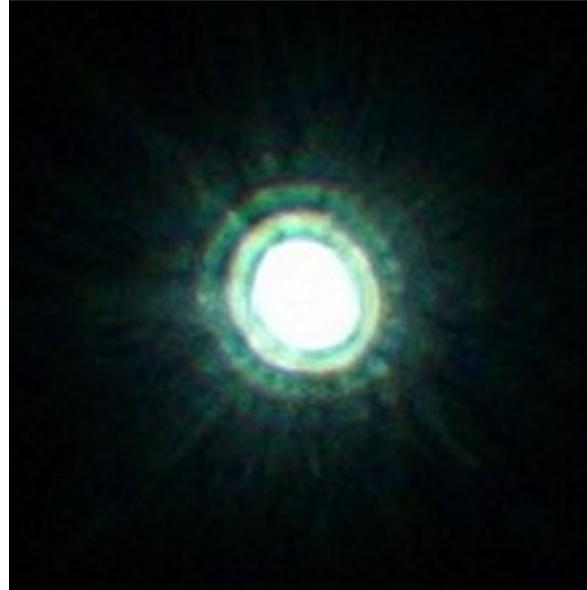


Image
plus grande que
prévue en optique
géométrique

Et un peu plus tard... Un rayon courbe ?!

Observations par Grimaldi



**La lumière après le trou 'éclaire' même l'ombre
derrière obstacle**

Et un peu plus tard... Un rayon courbe ?!

Interprétation de Grimaldi par analogie



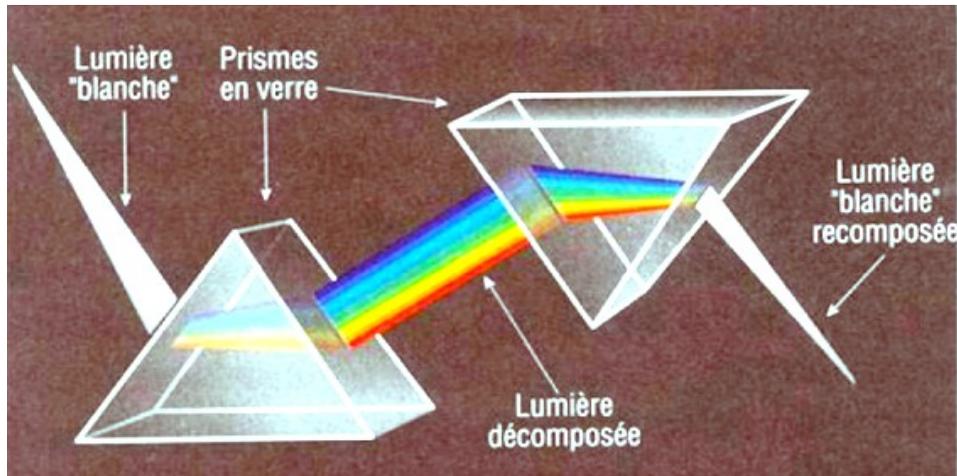
=> une onde

La lumière semble être composée de très petites particules, de très petits corpuscules, et elle se comporte parfois même
certains auteurs l'ont appelée « corpuscules ».
(Physico-mathématique de la lumière de Christiaan Huygens, 1690)

Seulement l'optique géométrique suffisait à rendre compte de (presque) tout...

Fin 17^{ème} siècle : une 1^{ère} bataille fait rage

Newton 1665-1704 : **Corpuscules**



La couleur est constitutive de la lumière
Elle ne provient pas du prisme

Lumière = 7* corpuscules (taille, masse)
> 7 couleurs 'primaires'
Se déplacent en ligne droite

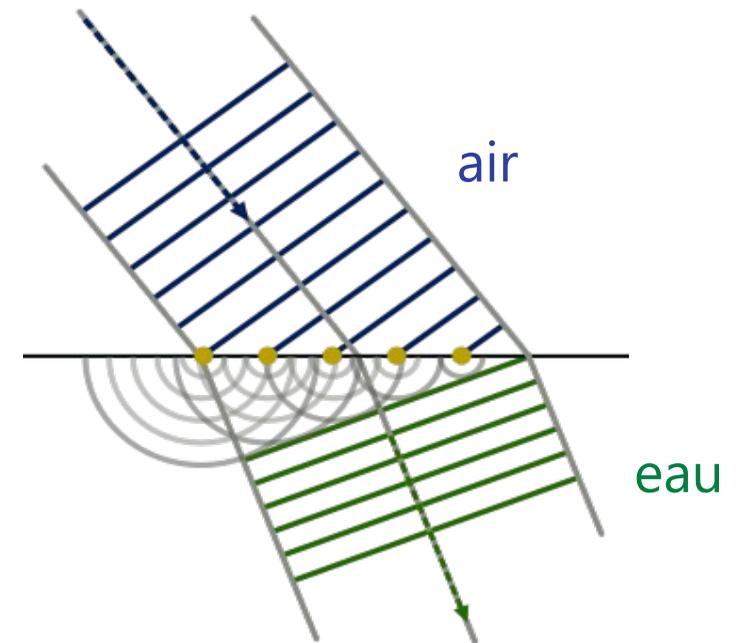


=> **vitesse dans eau > vitesse dans air**

7* : en accord avec ordre du monde (selon les grecs 7 tons en musique, astres dans le ciel, jours de semaine), surtout musique

Fin 17^{ème} siècle : une 1^{ère} bataille fait rage

1677-1690: Huygens
ONDE dans éther



Réfraction :

Au contact front - nouveau milieu (éther/air)

=> ondelette sphérique

=> vitesse dans eau < vitesse dans air

Ne permet pas d'expliquer :



**Et puis, en 1687 Newton publie
sa mécanique...**

7*: en accord avec ordre du monde (selon les grecs 7 tons en musique, astres dans le ciel, jours de semaine), surtout musique

un peu plus de 100 ans plus tard...

Crépuscule des corpuscules

1801: Thomas Young

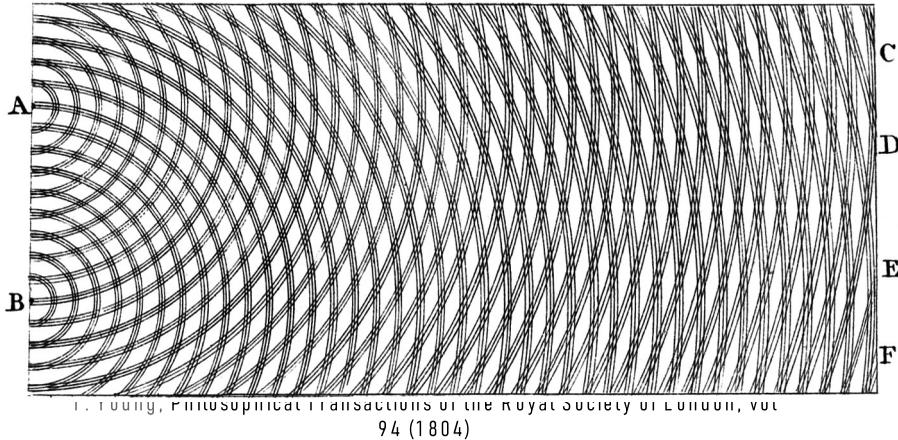
deux fentes => motif régulier, zones sombres (creux) et brillantes (crêtes)



https://www.sciencesetavenir.fr/fondamental/histoire-des-sciences/l-epopee-du-photon-ou-la-nature-double-de-la-lumiere_168635

Crépuscule des corpuscules

1801 : Thomas Young



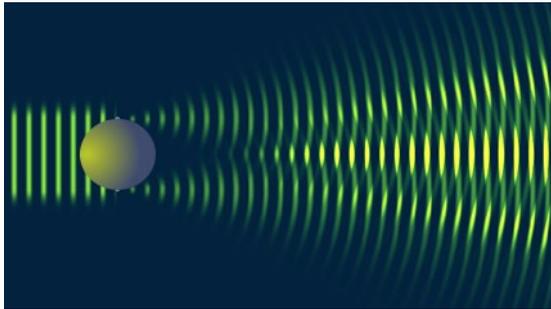
Interférences



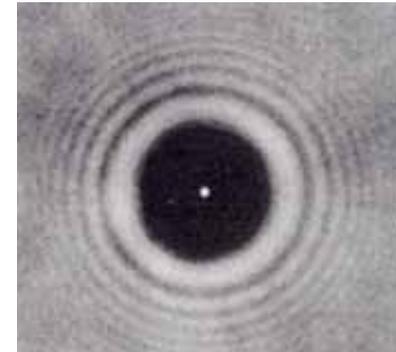
Crépuscule des corpuscules

1815-1817 : Auguste Fresnel

=> Poisson



??????



Si !!!!
(Arago)

1850 Foucault

vitesse dans eau < vitesse dans air

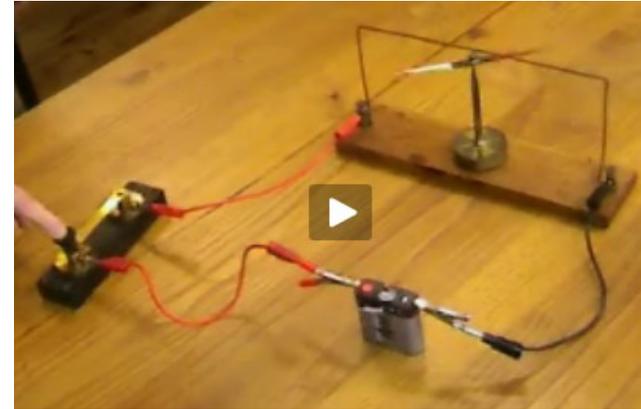
Newton avait tort et Huygens raison !

Pendant ce temps là....

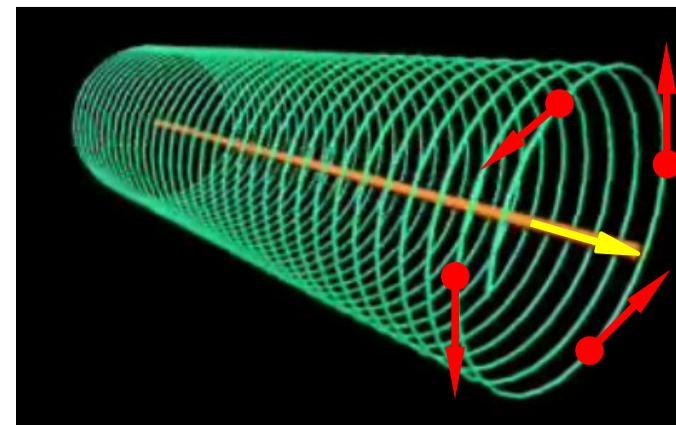
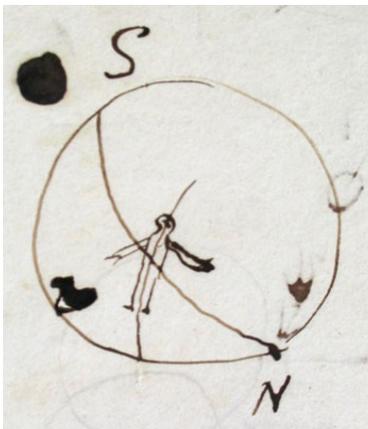
Deux mondes parallèles, puis...

1820 Ørsted :

La communication (passage)
d'électricité agit sur une
boussole (aimant)
!!!!



1820 Ampère :



Parallèle ? plutôt orthogonal !

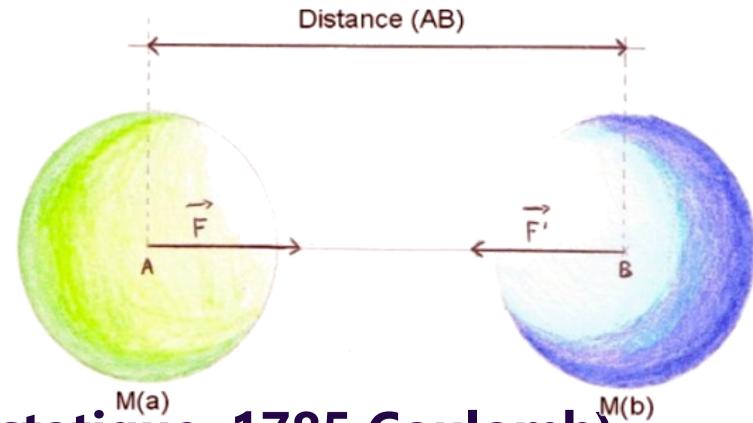
Newton:

i) Actions réciproques

ii) Forces instantanées, à distance, en $1/d^2$,

ii) issues de propriétés statiques

Masse (Gravité), Charge électrique (force électrostatique, 1785 Coulomb)



force perpendiculaire...???!!!

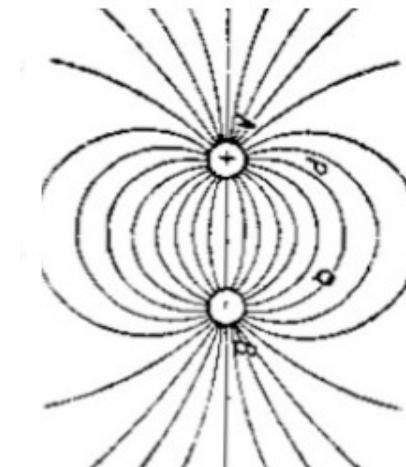
1821-31 : Faraday

Réciproque d'Oersted :

Aimant en mvt dans circuit

**⇒ apparition d'un courant
(induction)**

Force électromotrice



**Lignes de Forces:
Electriques
et
Magnétiques**

Interaction via ligne de force

La Naissance d'une onde

1855 Maxwell « On the Faraday's lines of Force »

Champ électromagnétique : $\vec{E} \perp \vec{B}$ et une Force EM

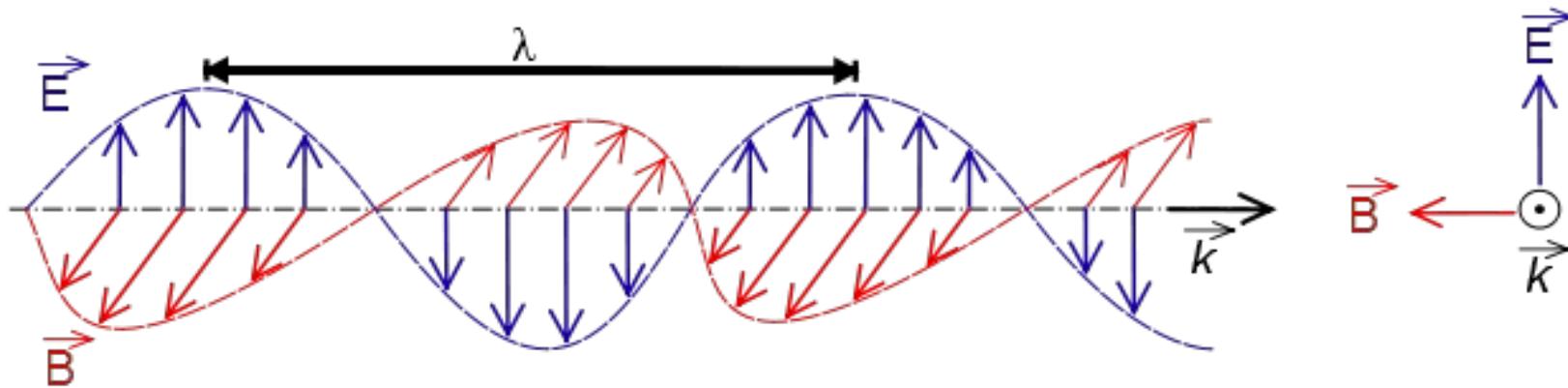
La Naissance d'une onde

1855 Maxwell « On the Faraday's lines of Force »

Champ électromagnétique : $\vec{E} \perp \vec{B}$ et une Force EM

Quand il n'y a plus ni courant ni charge ?

\vec{E}, \vec{B} décrits par équation d'une **corde vibrante** (Alembert), **une onde !**



$\lambda = c/\nu$, λ longueur d'onde, ν fréquence, c célérité

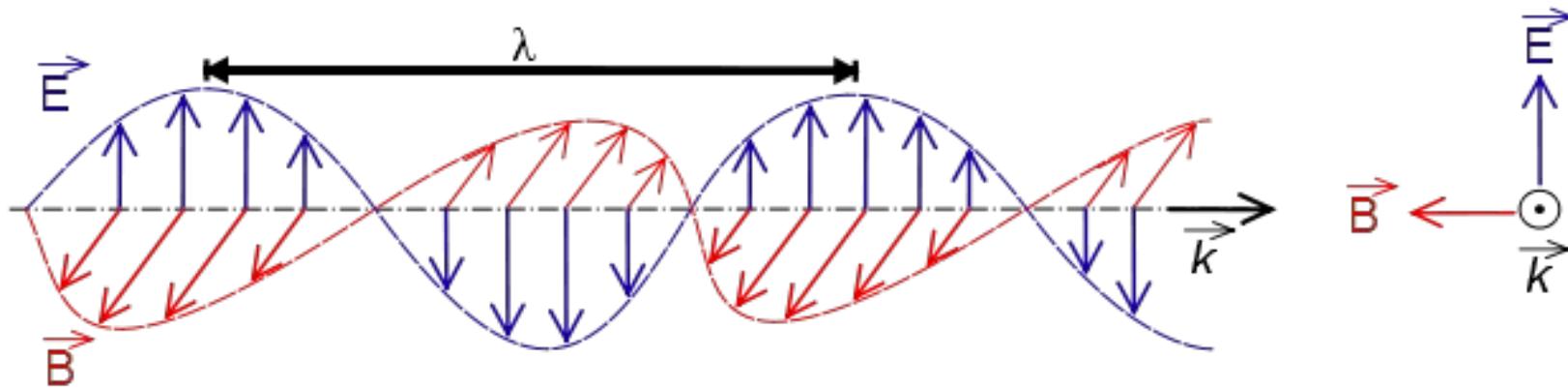
La Naissance d'une onde

1855 Maxwell « On the Faraday's lines of Force »

Champ électromagnétique : $\vec{E} \perp \vec{B}$ et une Force EM

Quand il n'y a plus ni courant ni charge ?

\vec{E}, \vec{B} décrits par équation d'une **corde vibrante** (Alembert), **une onde !**



$\lambda = c/\nu$, λ longueur d'onde, ν fréquence, c célérité
célérité $\approx v_{\text{lumière}}$ mesurée (Fizeau, Foucauld)

=> La lumière est une onde électromagnétique (éther ???)

La Naissance d'une onde

1865 Maxwell « A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field »

Champ électromagnétique : $\vec{E} \perp \vec{B}$ et une Force EM

"The agreement of the results seems to show that light and magnetism are affections of the same substance, and that **light is an electromagnetic disturbance propagated through the field according to electromagnetic laws**"

Seconde Unification classique

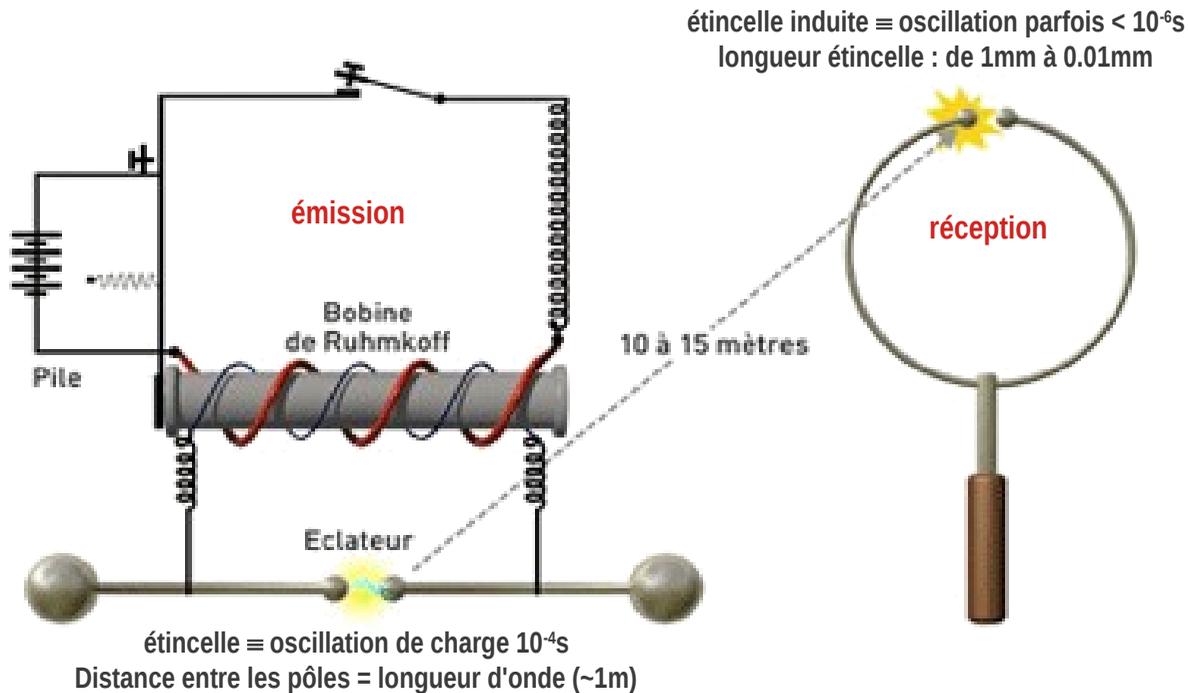
Hyp : source = oscillateurs chargés dans la matière

Est-ce bien vrai M. Maxwell ?

1886-1889 : H. Hertz*

Maxwell: onde E.M. engendrée par vibration charges (oscillateurs)

⇒ Construire un diapason électrique ( onde mécanique 440Hz)



*Oncle du Nobel Gustav Hertz

Est-ce bien vrai M. Maxwell ?

1886-1889 : H. Hertz*

Maxwell: onde E.M. engendrée par vibration charges (oscillateurs)

⇒ Construire un diapason électrique ( onde mécanique 440Hz)

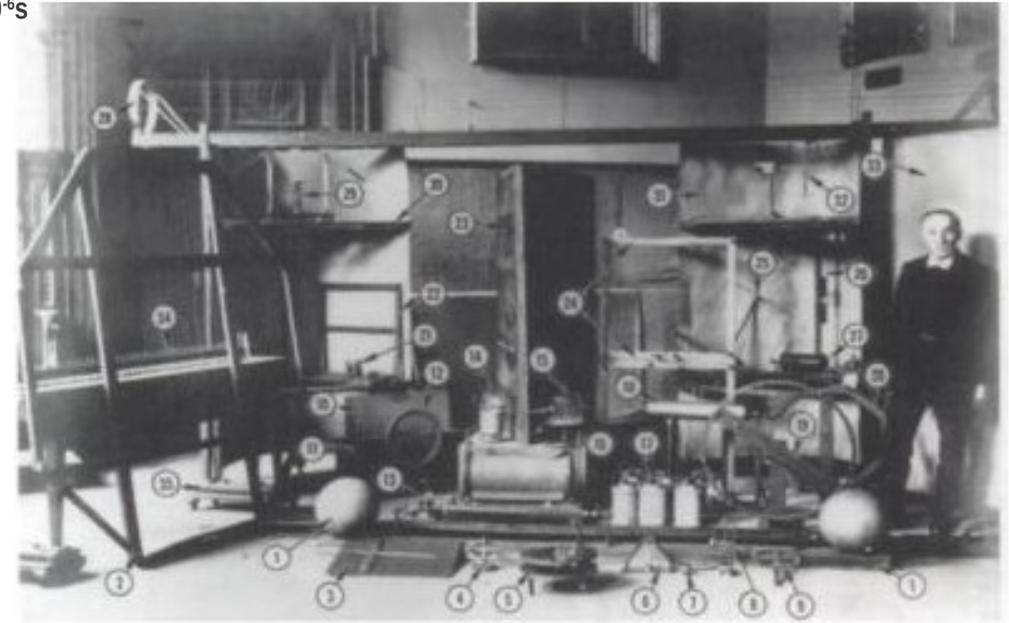
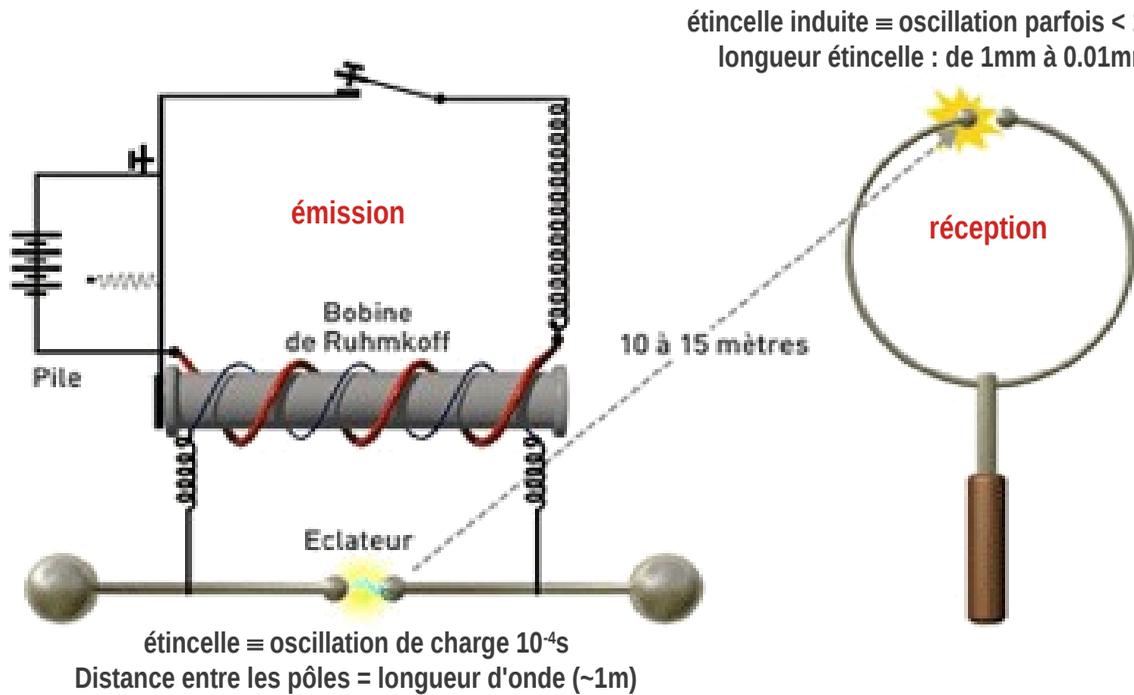


Figure 3. Photograph of equipment used by Hertz. Laboratory equipment, plus apparatus designed by Hertz and built with his mechanic assistant, Julius Amman (shown in Munich in

Il y a bien des ondes EM, elles peuvent être émises, reçues et telles la lumière être réfléchies, réfractées, polarisées....

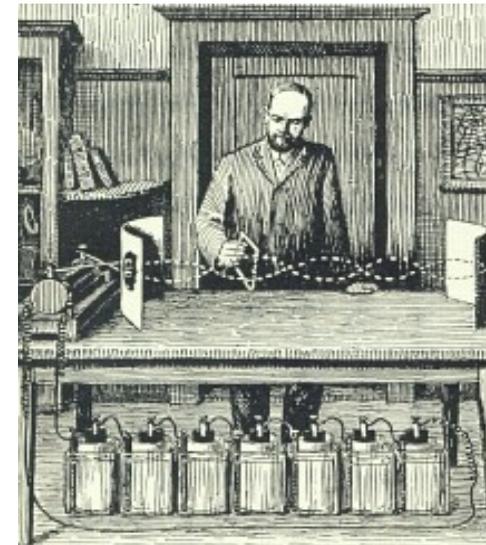
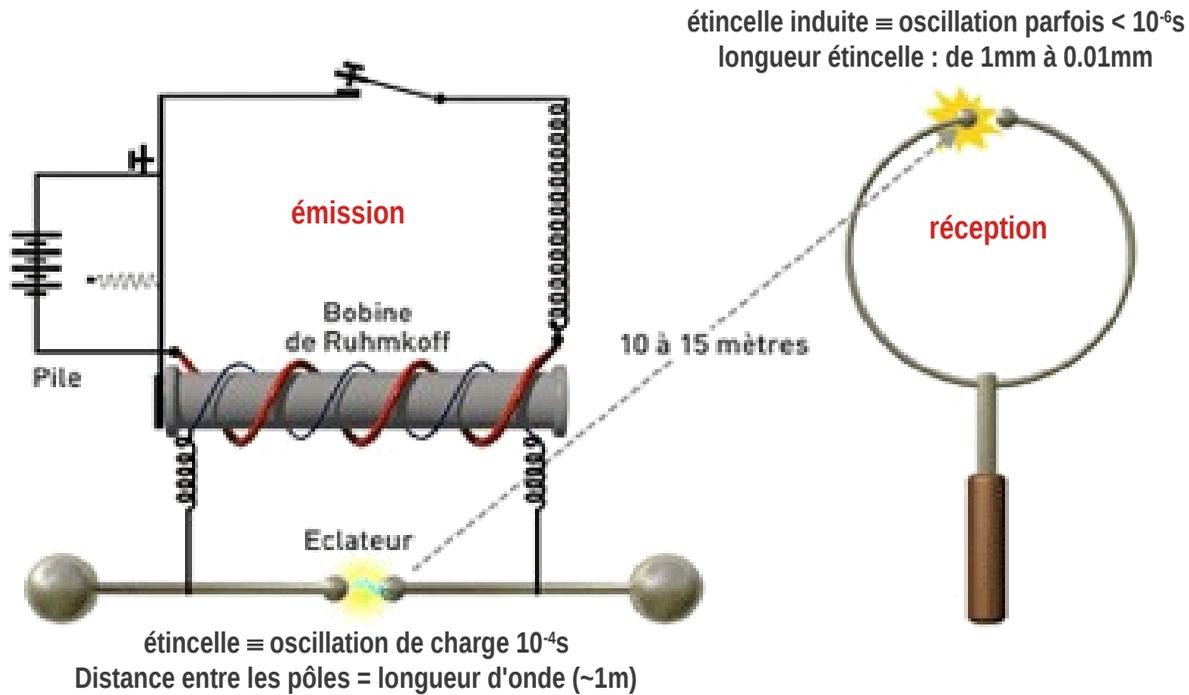
*Oncle du Nobel Gustav Hertz

Est-ce bien vrai M. Maxwell ?

1886-1889 : H. Hertz*

Maxwell: onde E.M. engendrée par vibration charges (oscillateurs)

⇒ Construire un diapason électrique ( onde mécanique 440Hz)



Il y a bien des ondes EM, elles peuvent être émises, reçues et telles la lumière être réfléchies, réfractées, polarisées....

Il pense que son travail n'a aucune espèce d'application...
Il meurt en 1894, à 36 ans,
sans voir les inventions qui en découlent:
la radio, la transmission sans fil ...

*Oncle du Nobel Gustav Hertz

En bonus : Effet de Hertz

1887 H. Hertz

Pour mieux voir 2nde étincelle
⇒ récepteur dans boîte noire



⇒ Charge/Décharge est favorisée par le quartz/UV
Publie sans explications et retourne à Maxwell

Ce sera un des phénomènes les plus discutés
dans le débat à venir

En attendant les ondes sont bel et bien là...

Lumière semble faite sur la lumière

Le calme avant la tempête

En Avril 1900 W. Thomson (Lord Kelvin) parlait (à une conférence au 'Royal Institution') de "(deux) nuages sur la théorie de la lumière et de la chaleur" par ailleurs qualifiée de "belle et claire"...



Source photo: <http://www.abc.net.au/news/photos/2008/02/27/2173620.htm>

Le calme avant la tempête

En Avril 1900 W. Thomson (Lord Kelvin) parlait (à une conférence au 'Royal Institution') de "(deux) nuages sur la théorie de la lumière et de la chaleur" par ailleurs qualifiée de "belle et claire"...

qui va bien s'obscurcir....



Source photo: <http://www.abc.net.au/news/photos/2008/02/27/2173620.htm>

Le calme avant la tempête

En Avril 1900 W. Thomson (Lord Kelvin) parlait (à une conférence au 'Royal Institution') de "(deux) nuages sur la théorie de la lumière et de la chaleur" par ailleurs qualifiée de "belle et claire"...

qui va bien s'obscurcir....

Equations de Maxwell violent le principe Galiléen

→ thermodynamique et caractère ondulatoire
de la lumière émise
par un corps à l'équilibre thermique

Nature de la lumière des corps chauds

1854-1858: Kirchhoff



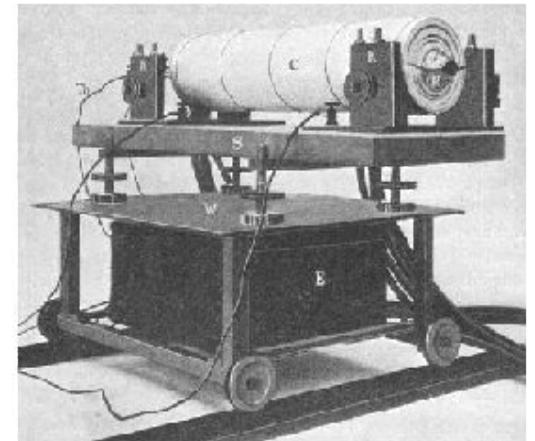
Tout corps dense (solide) **chaud** émet un spectre continu de lumière, indépendant de sa forme, de sa nature.

Intensité = $f(\text{température } T, \lambda)$?

Invention du « Corps noir »

La lumière qu'il émet provient de son seul état thermique

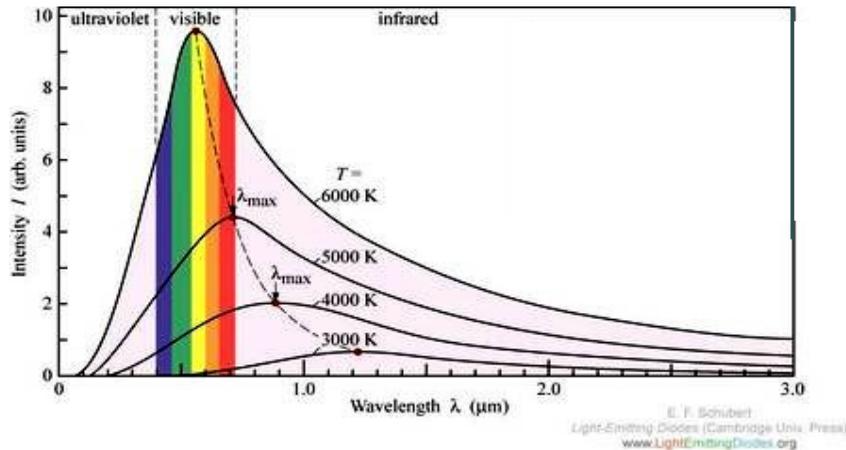
1 cylindre isolé que l'on chauffe,
1 petit trou



Credit: Getty Images/iStockphoto pour <https://www.maxicours.com/>

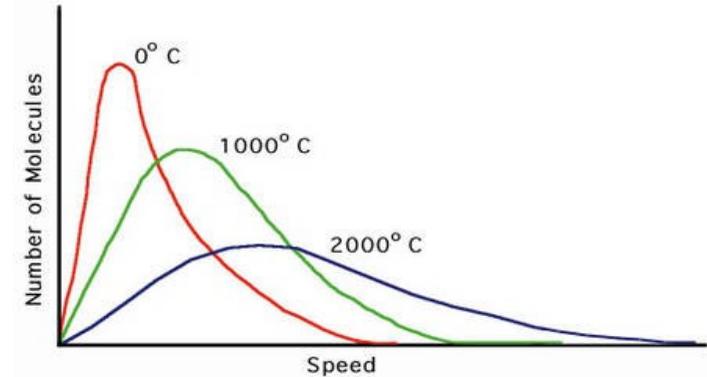
Une première approche et premier modèle

1896: Wien



Intensité lumineuse en fonction de la longueur d'onde et de la température

Similarité !



Loi de distribution statistique des vitesses (énergie cinétique) en fonction de T (molécules sans interactions, indépendantes) (Maxwell 1860/ Boltzmann 1872)

=> **loi du rayonnement de Wien**

formule empirique (avec des constantes ad hoc)

$$f_{\text{Wien}}(T, \lambda)$$

N.B : désaccord avec expérience à grand λ

Une seconde approche et un second modèle

1900: Rayleigh

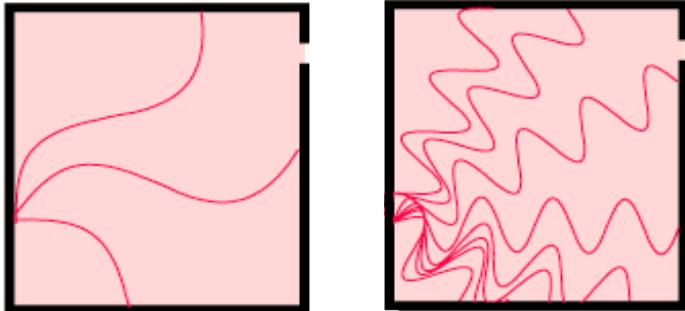
Ingrédients : Onde de Maxwell + équilibre thermodynamique

Equilibre thermique = état stationnaire du rayonnement EM,

- * 1 onde reçue => 1 onde émise par oscillateur (les ondes s'annihilent sur les parois)
- * Chaque onde possède énergie moyenne des particules dans gaz à T ($kT/2$)
- * oscillateurs sont indépendants

Calcul du nombre N d'ondes par unité volume

$$f_{\text{Rayleigh}}(T, \lambda)$$



Bon accord avec les mesures =>
**le rayonnement thermique est bien
de nature EM**
et les oscillateurs sont confirmés...

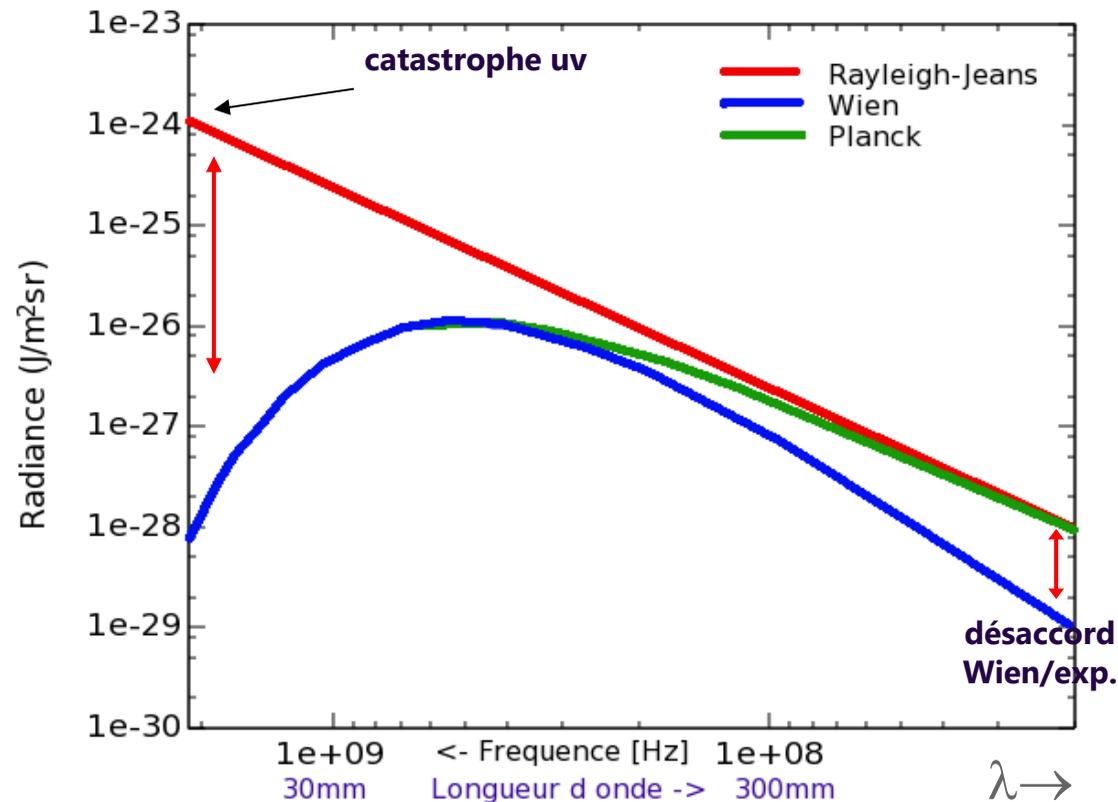
MAIS : Nbre ondes \nearrow si $\lambda \rightarrow 0 \dots$ Catastrophe UV* : infini !

* Ehrenfest 1911

Une révolution : un coups de pouce quantique

1900 Planck (élève de Kirchoff)

Les deux formules peuvent être mises d'accord et reproduire l'expérience si :

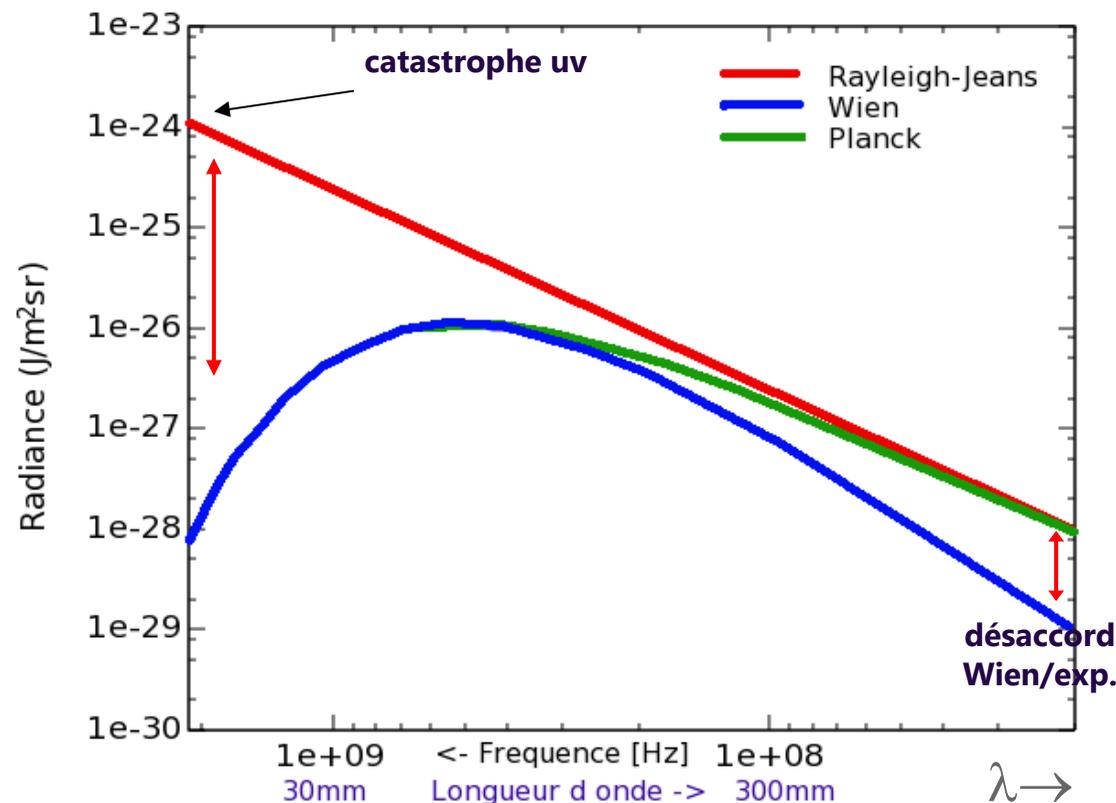


$\lambda \gg 1$:
Ajouter -1
dénominateur
Wien \Rightarrow Wien*

Une révolution : un coups de pouce quantique

1900 Planck (élève de Kirchhoff)

Les deux formules peuvent être mises d'accord et reproduire l'expérience si :



$\lambda \ll 1$:
Rayleigh = Wien*
Si, par identification,
 $E = n\varepsilon$
avec $\varepsilon = h\nu$, $\nu = c/\lambda$

$\lambda \gg 1$:
Ajouter -1
dénominateur
Wien => Wien*

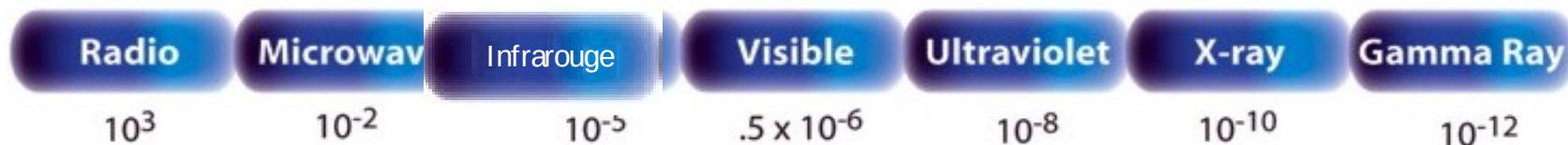
h "Hilfkonstante"
6.62 10⁻³⁴ Js.
(Millikan 1916)

HYP. PLANCK: énergie thermique ↔ énergie E.M par "quanta d'énergie"

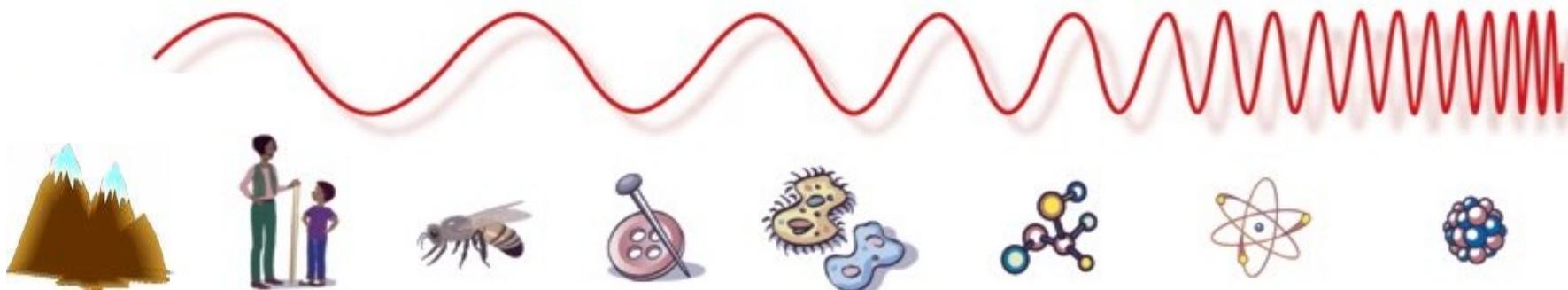
Les Ondes EM sauvées, « juste étranges » dans les échanges d'énergie, quantifiés !

Spectre électromagnétique et corps noir

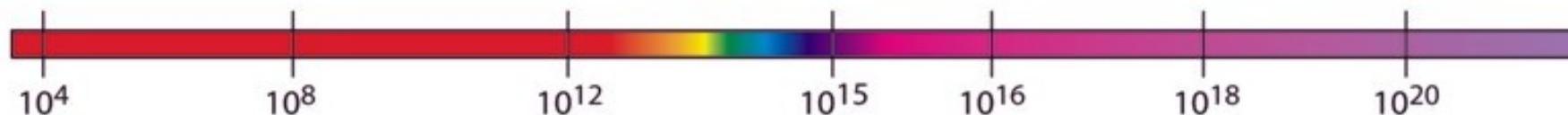
Longueur d'onde (m)



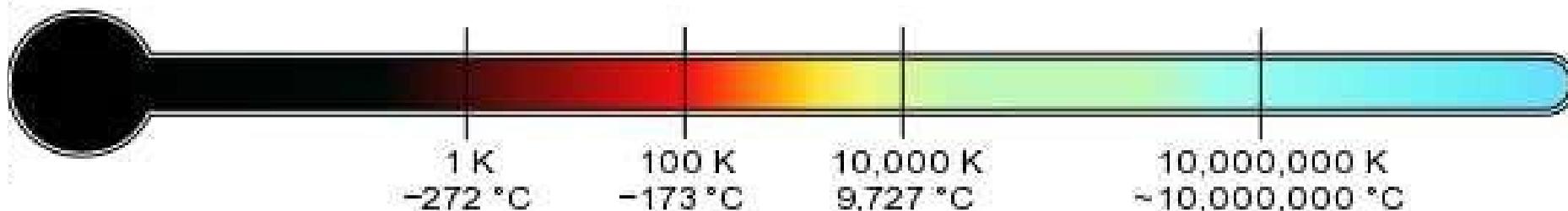
Taille équivalent à



Fréquence (Hz)



Température du corps noir émettant l'onde (K)

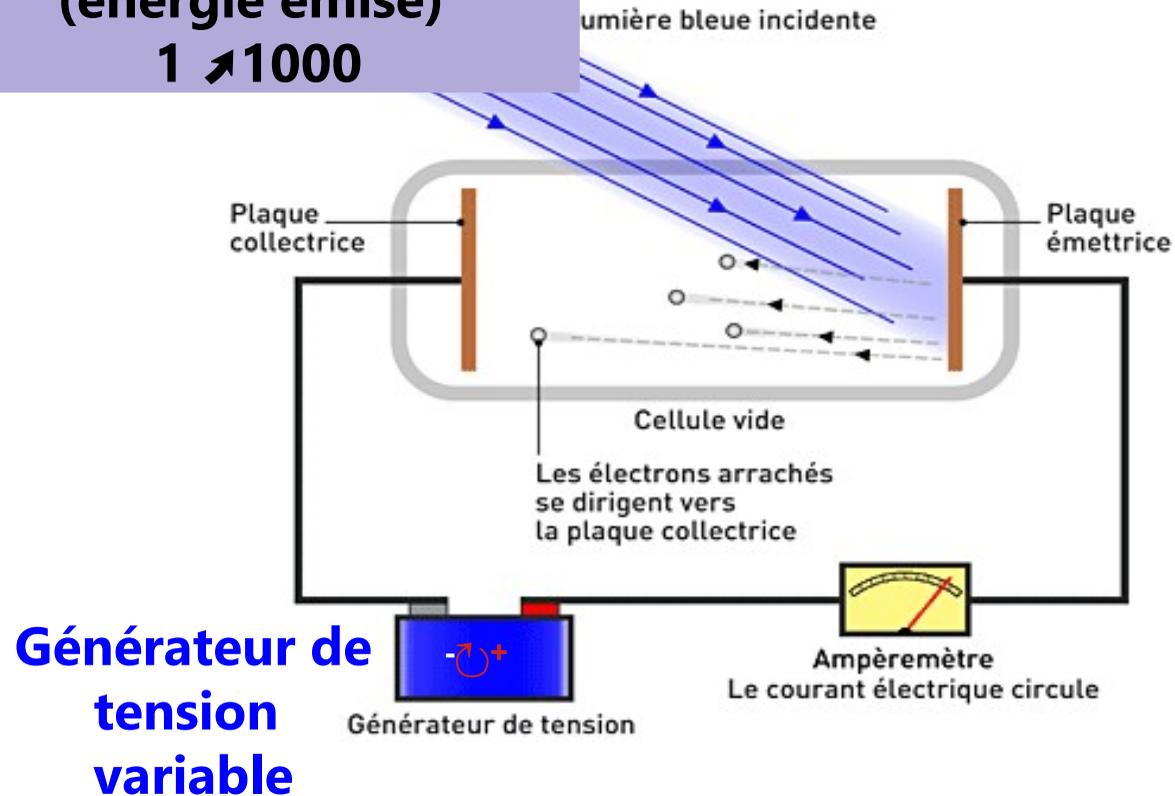


Effet de Hertz = Effet photoélectrique

1902: Lenard (assistant de H. Hertz)

Lampe à arc Luminosité
(énergie émise)
 $1 \nearrow 1000$

En physique Classique :
La lampe chauffe la plaque
accumulation de chaleur,
Quand T suffisante
 \Rightarrow émission d'e-



Mesures :

- I_{col} (soit le # d'e⁻ atteignant collectrice)
- V_{stop} qui arrête les e⁻ \Rightarrow énergie cinétique e⁻

Effet de Hertz = Effet photoélectrique

1902: Lenard (assistant de H. Hertz)

1 - Le phénomène n'a rien à voir avec l'accumulation de chaleur :

Emission quasi instantanée

2- Les ondes ne semblent pas correspondre à celles de Maxwell :

- **Onde Maxwell Energie = Luminosité or ici Energie = $f(1/\lambda)$**
- **longueur d'onde max (énergie min) : aucun e- pour $\lambda > \lambda_{\max}$**
- **λ_{\max} dépend du matériau de la plaque**

1905 : Année d'Einstein (4 publications majeures)

**Effet photoélectrique ne s'explique que par chocs entre corpuscules,
et non par accumulation de chaleur**

Corpuscules de lumière (photon) porteur de l'énergie des quanta de Planck

Rayonnement lumineux \equiv flux de particules $E_\nu = h\nu$, où $\nu = c/\lambda$

Nobel pour Einstein en 1921

Corpuscule : le retour !

**Lumière = Corpuscule et onde ?????!!!!
La révolution quantique est en marche....**

Déroutant monde quantique : Dualité onde-corpuscule

1923-24: L. De Broglie

La lumière, onde E.M., présente un aspect corpusculaire (photons)

Réciproquement

Tous les corpuscules (e-, p, n, atomes, molécules...) doivent avoir un aspect ondulatoire

Longueur d'onde de De Broglie:

$\lambda = h/p$ où $p =$ quantité de mouvement

Ex : nous $\sim 70\text{kg}$, $v = 4\text{km/h}$: $\lambda = 6,6 \cdot 10^{-41} \text{ m}$!

Particule alpha ($E \sim 5\text{MeV}$) : $p = \sqrt{2mE}$ $\lambda = 6,6 \cdot 10^{-15} \text{ m} \sim$ noyau atome

Effets quantiques sensibles : physique 'microscopique'

Mécanique ondulatoire (ou mécanique quantique):

Déroutant monde quantique : Indeterminé, probabiliste

1925 : Schroedinger
particule décrite par une fonction d'onde

nuage de probabilités

1927: Heisenberg

Inégalités de Heisenberg:

Contrairement à la mécanique classique, pour une particule donnée,
**impossible de connaître simultanément sa position
et sa vitesse exacte, selon les inégalités**

$$\Delta x \Delta p \geq \hbar/2 \quad \Rightarrow \quad \Delta x \Delta v \geq \hbar/2m \text{ et si } m \text{ et } \Delta x \text{ petits, } \Delta v \text{ immense}$$

$$\Delta E \Delta t \geq \hbar/2$$

...

N.B : il vaut mieux parler d'indétermination que d'incertitude

Déroutant monde quantique : révolution de la physique

**Plus de localisation
plus de 'trajectoire' définie**

Fin du déterminisme !

Comment caractériser un système ?

	Classique	Quantique
etat d'un système	position(s) + impulsion(s)	probabilité de presence(s)
Evolution	une trajectoire (déterminisme)	plusieurs états finaux plusieurs chemins (états intermédiaires)

Et en plus la Relativité ($E=mc^2$) ouvre des possibilités ...

Pour s'y retrouver :

- 1 règles de sélections (états/transitions) basées sur des **nombre quantiques**
- 2 méthodes de calcul : **les diagrammes de Feynman**

Un nombre quantique pas classique

spin : propriété quantique intrinsèque, permet de caractériser le comportement, la symétrie d'une particule sous l'effet de rotations.

Une particule a un spin s si invariante par rotation d'angle $2\pi/s$. (ou $360^\circ/s$)

Ex : si les cartes à jouer étaient quantiques

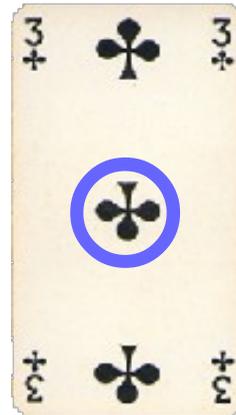


180° ok
 $s = 2$



360° ok
 $s = 1$

≠



$s = 1/2 \Rightarrow$ rotation de 4π
pour que l'objet soit tel qu'à 0°

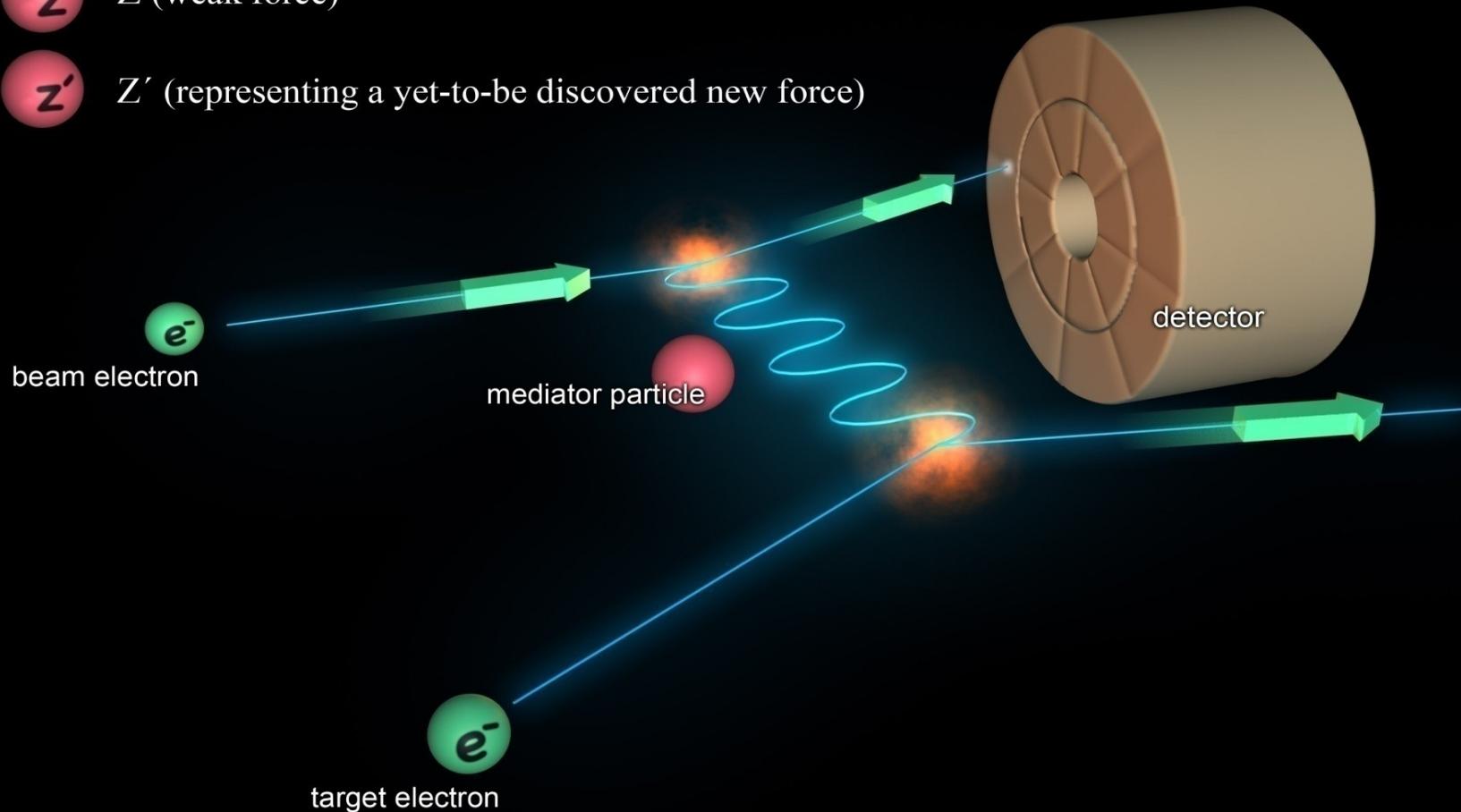
Pourtant toute une famille de particules, les **fermions**, ont un **spin** $1/2$ entier, les nucléons (composites: protons, neutrons), électrons, neutrino, quarks

Idée de S. Hawking.

Billard quantique : Un diagramme de Feynman

Beam electrons may interact with target electrons by exchanging a mediator particle:

-  photon (electromagnetic force)
-  Z (weak force)
-  Z' (representing a yet-to-be discovered new force)



Description quantique d'une interaction

Action à distance "quantifiée"

⇔ échange de quantum d'interaction ≡ particules médiatrices

IN2P3
Institut National de Physique Nucléaire
et de Physique des Particules

Les **3/4** interactions de la nature sont décrites par l'échange de particules

exemple d'une interaction répulsive

TYPE	FORCE RELATIVE	PARTICULES ÉCHANGÉES	EXEMPLE DE DOMAINE D'APPLICATION
FORTE	~ 1	gluons	noyau, nucléons
ÉLECTROMAGNÉTIQUE	$\sim 10^4$	photons	cortège électronique de l'atome, lumière, chimie
FAIBLE	$\sim 10^6$	bosons Z^0, W^+, W^-	radioactivité β énergie solaire
GRAVITATION	$\sim 10^{-38}$	graviton ?	pesanteur systèmes planétaires

T10

OK

OK

OK

Pas OK

