

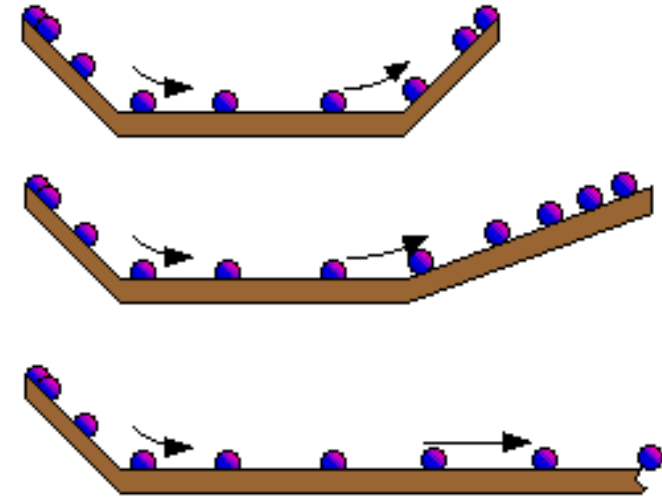
# Introduction à la Physique Moderne:

I. Deloncle et Xavier Garrido

# En un temps un mouvement

Entre 1602 et 1632: Galilée fonde la physique moderne

Espace  $\rightarrow$  Espace  $(x,y,z)$  + Temps  $(t)$   
 $\Rightarrow \Delta t$   
 $\Rightarrow$  Vitesse 'v' en fonction de t,  
variation mouvement « instantanée »



Futura.sciences.com © N. Alberding

Principe "faible" d'inertie (Pfl):

Rien n'est nécessaire pour conserver v

Rq: Galilée essaiera de mesurer la vitesse de la lumière avec une lanterne

# En un temps un mouvement

Entre 1602 et 1632: Galilée fonde la physique moderne

Principe de relativité Galiléenne:

"Si le mvt est uniforme, il est comme rien"

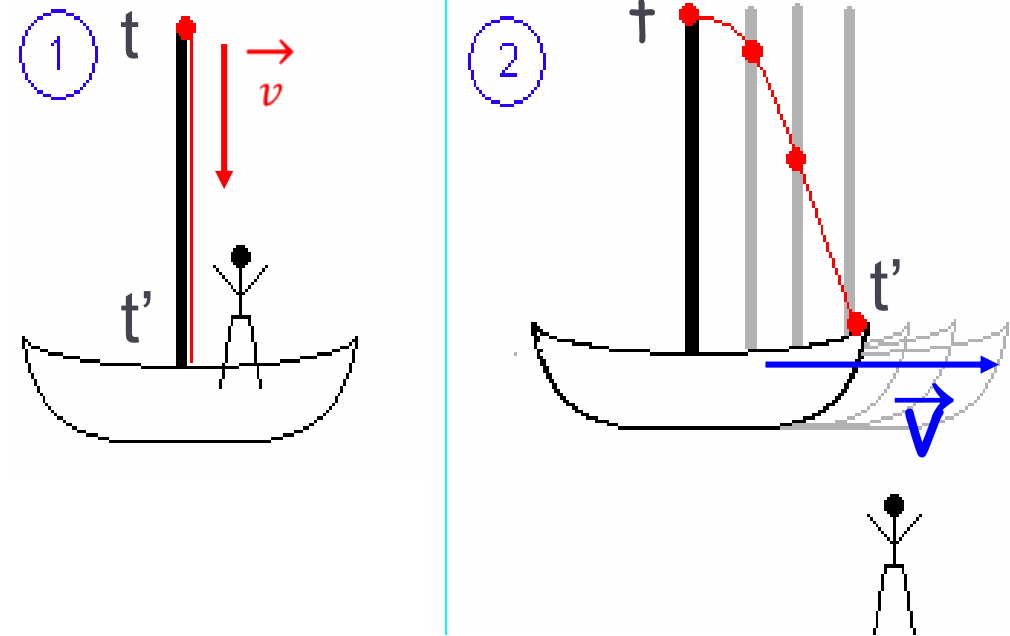
$v = c^{ste}$  équivalent à  $v = 0$  c'est RELATIF.

Pas repos absolu

Loi de Composition Vitesse

$$\vec{v}_{\text{bateau}/1} = 0 \text{ et } \vec{v}_{\text{balle}/1} = \vec{v}$$

$$\vec{v}_{\text{bateau}/2} = \vec{V} \text{ et } \vec{v}_{\text{balle}/2} = \vec{v} + \vec{V}$$



Transformation Galilée:

$$x_1 \rightarrow x_2 = x_1 + Vt$$

$$t_1 = t_2$$

# Newton (1687): force est accélération..

Leibnitz depuis a inventé le calcul infinitésimal 'dt':  
v vitesse, a accélération, instantanées

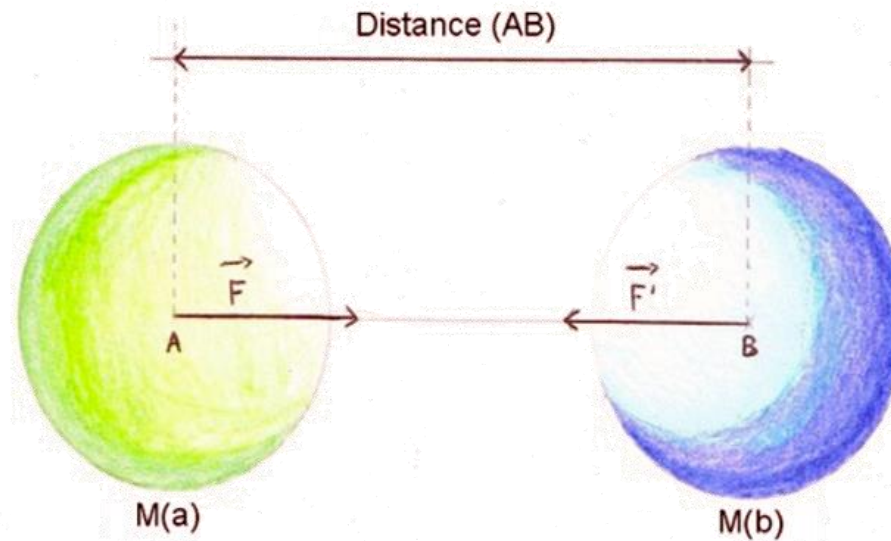


Image <http://gravitation-universelle.g.r.pic.centerblog.net/7becf42c.jpg>

1) Principe interaction (actions réciproques)

**F instantanée, à distance, intensité en  $1/d^2$**

⇒ Loi de la gravitation (attraction universelle)  
sans éther

# Newton (1687): force est accélération..

## 2) Principe Fondamental Dynamique (PFD): $\sum \vec{F} = m\vec{a}$

3) Donc,  $\sum \vec{F} = \vec{0} \Rightarrow \vec{v} = \overline{cste}$  c'est le P.f.I. de Galilée

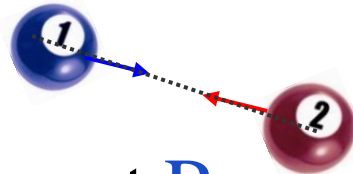
1644 Descartes:

Quantité de mouvement **P**

$$\Rightarrow \vec{P}_G = \sum m_i \vec{V}_i = \overline{cste}$$

1669 Huygens:

$$\Delta\left(\frac{1}{2} m_G \vec{V}_G^2\right) = W(\sum \vec{F}) = 0$$



**Corollaire:** Principe de Relativité (invariance Galiléenne)

2 référentiels Galiléens sont identiques pour la physique,

Transformation Galilée ne change pas le PFD

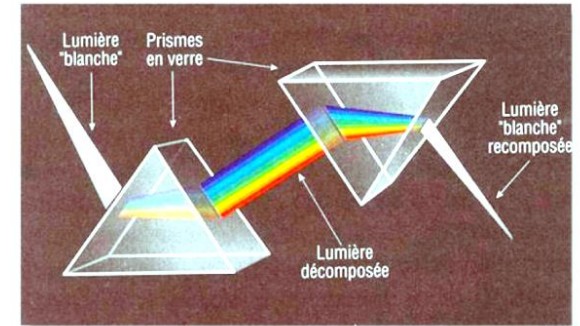
# Lumière: 17ième siècle, une 1ère bataille fait rage

Deux conceptions et leurs défenseurs principaux

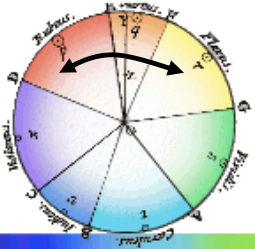
Newton

1665-1704:

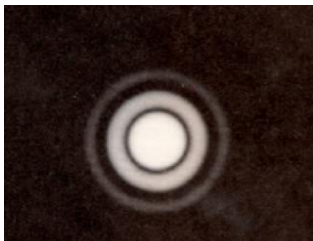
couleur est constitutive de la lumière  
et ne provient pas du prisme



Lumière = 7\* corpuscules (taille, masse)  
=> 7 couleurs 'primaires'



Réfraction : **corpuscules**  
**vitesse dans eau > vitesse dans air**



Diffraction: corpuscules mais avec effet de bord : collisions!

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

# Lumière: 17ième siècle, une 1ère bataille fait rage

Deux conceptions et leurs défenseurs principaux

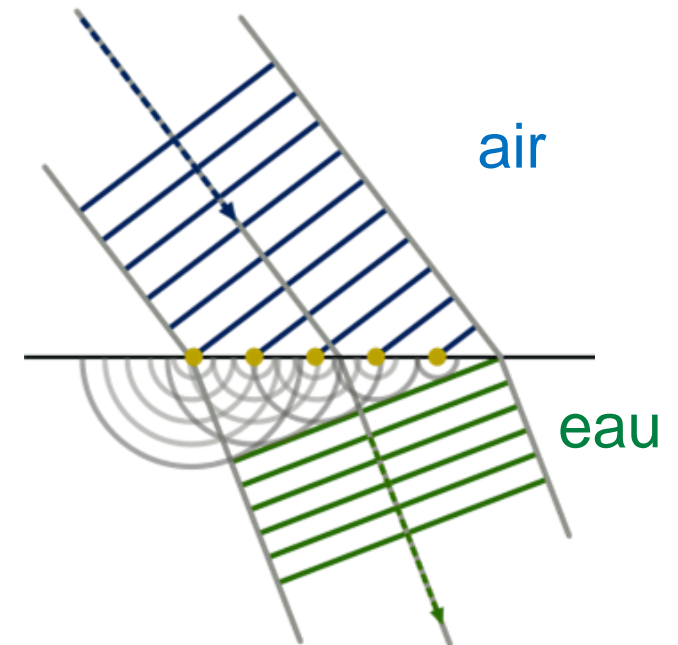
## 2) Huygens 1678

Lumière = onde formée d'ondelettes

contact front - nouveau milieu (éter/air)

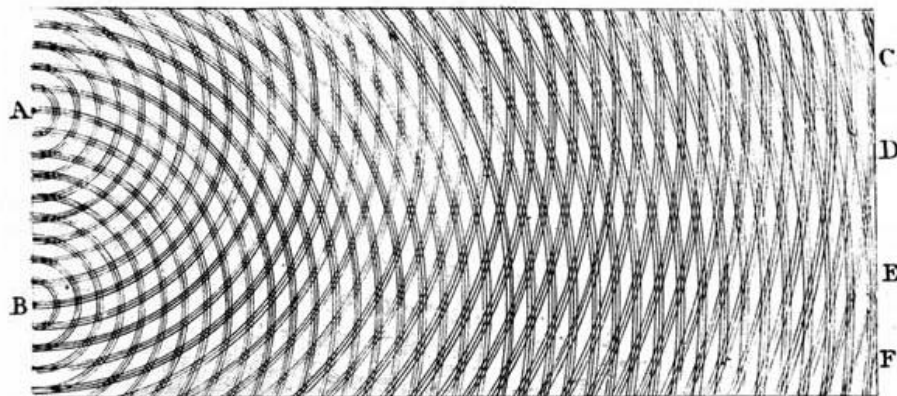
⇒ ondelette sphérique

Réfraction onde: vitesse eau < vitesse air



# 19<sup>ème</sup> siècle: L'hallali : de Young à Foucault...

1803: Thomas Young zones sombres (creux) et brillantes (crête)



T. Young, Philosophical Transactions of the Royal Society of London, vol 94 (1804)



=> Interférence

Newton : Corpuscules (avec effet de bords)  
faisant un motif régulier après collisions !!!????

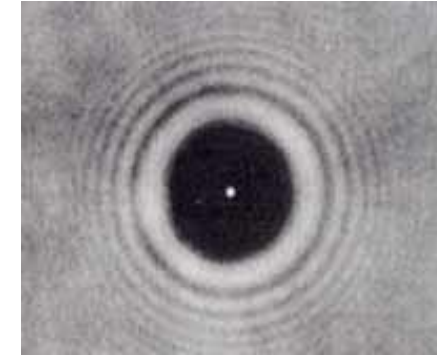
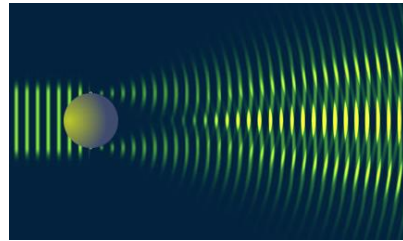


# L'hallali : de Young à Foucault...

1817 : Fresnel

⇒ Poisson  
s'oppose:

Lumière au  
centre  
d'une ombre ?



⇒ Oui!  
Arago

1850 Foucault

Mesure  $v_{lumière}^{air} > v_{lumière}^{eau}$  Newton avait tort, Huygens raison

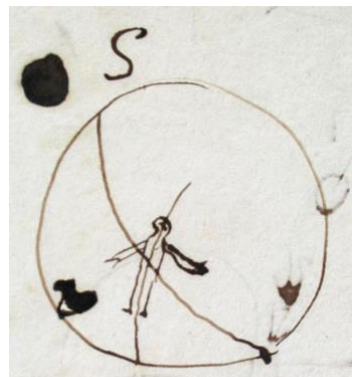
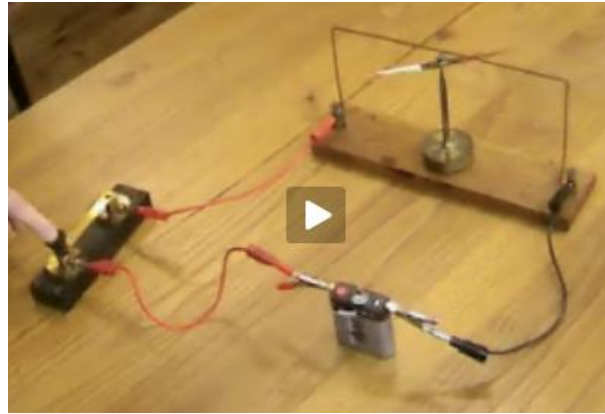
Des ondes mais de quelle sorte ?  
et cet éther luminifère ???

# Deux mondes parallèles puis ...

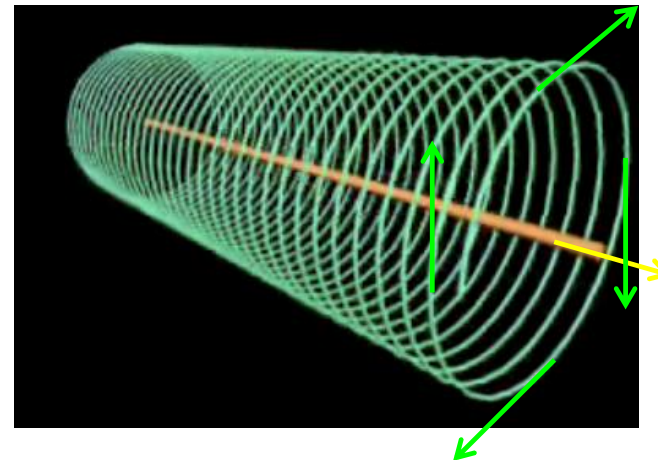
1820 Ørsted

mondes magnétique et électrique sont liés:

Communication d'électricité agit sur boussole (aimant)



1820 Ampère

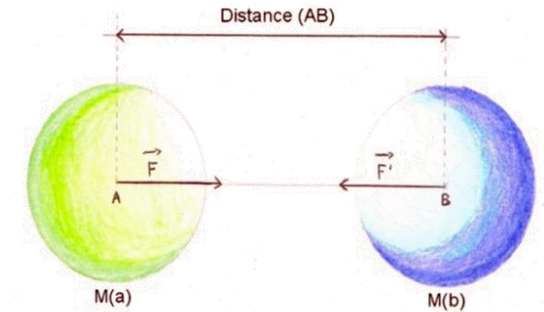


# Pas de parallèle, plutôt désorientant...

Rappel Newton: actions réciproques

Forces instantanées, à distance, intensité en  $1/d^2$ ,  
issues de prop. statiques telles masse (gravité)

Charge électrique (force électrostatique, 1785 Coulomb)

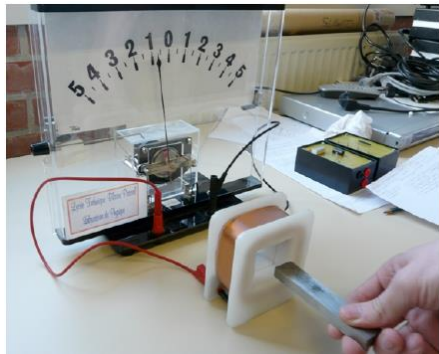


Or Oersted

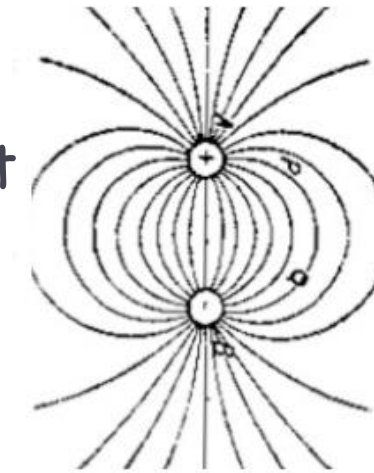
=> Forces non pas parallèles, mais plutôt perpendiculaires...???!??!

# Pas de parallèle, plutôt désorientant...

1821-52 : Faraday



**Réciproque d'Oersted :**  
Aimant en mvt dans circuit  
⇒ Force électromotrice:  
apparition courant  
(induction)



**Lignes de Forces:**  
Electriques et  
Magnétiques  
Interaction:  
via ligne de force  
⇔ Ex: q-Ligne-q

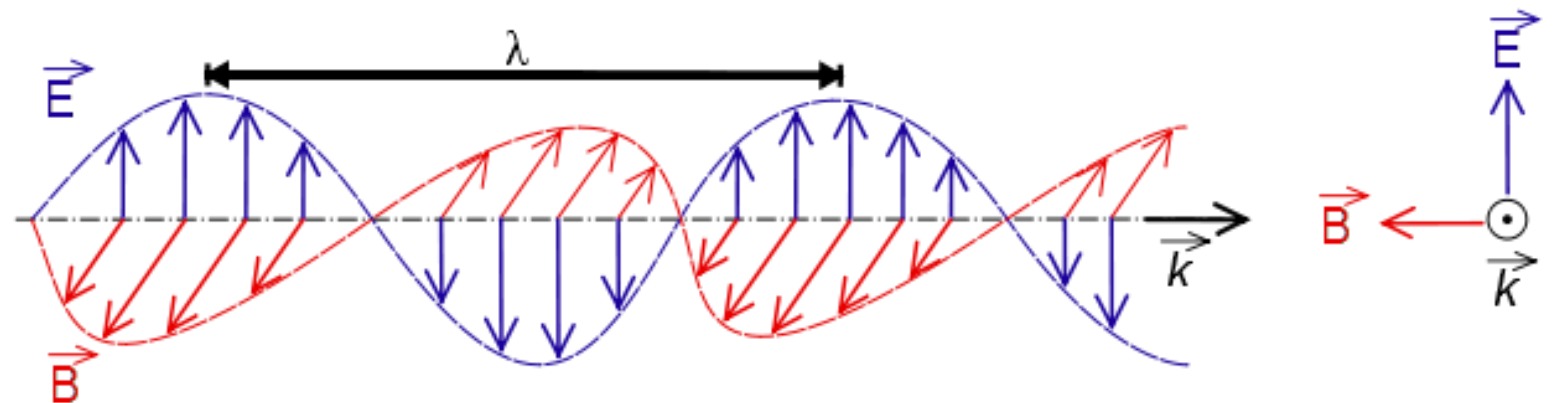
# Onde : le retour

1864 Maxwell: Equations du **champ Electromagnétique** et de la Force EM

- charges (statique) et/ou variation de B ( $B(t) \Rightarrow E$ )
- courant (dynamique) et/ou variation de E ( $E(t) \Rightarrow B$ )

Si ni courant ni charge ?

Equation de d'Alembert de corde vibrante: **une onde !**




$v_{\text{onde}} = \text{cste (milieu)} = 310\,740\,000 \text{ m/s} \approx v_{\text{lumière}} \text{ mesurée}$   
 $\Rightarrow$  **La lumière est une onde électromagnétique (dans éther ???)**

# En êtes-vous sûr Mr Maxwell ? H. Hertz\* (1886)

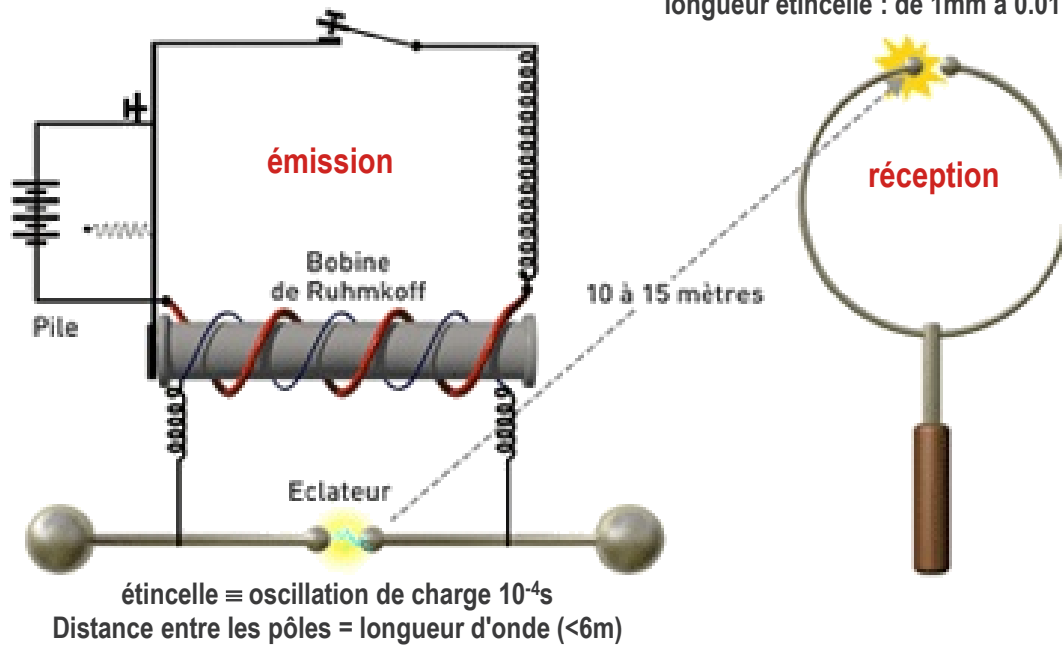
Maxwell: onde E.M. engendrée par vibration charges

\*Oncle du suivant, le Nobel F. Hertz

2 champs  $\vec{E}$  et  $\vec{B}$  oscillants se propageant (éther)

⇒ Construire un diapason électrique (  ≡ onde mécanique 440Hz)

étincelle induite ≡ oscillation parfois  $< 10^{-6}s$   
longueur étincelle : de 1mm à 0.01mm




# En êtes-vous sûr Mr Maxwell ? H. Hertz\* (1886)

Maxwell: onde E.M. engendrée par vibration charges

\*Oncle du suivant, le Nobel F. Hertz

2 champs  $\vec{E}$  et  $\vec{B}$  oscillants se propageant (éther)

⇒ Construire un diapason électrique (  ≡ onde mécanique 440Hz)

étincelle induite ≡ oscillation parfois  $< 10^{-6}$ s  
longueur étincelle : de 1mm à 0.01mm

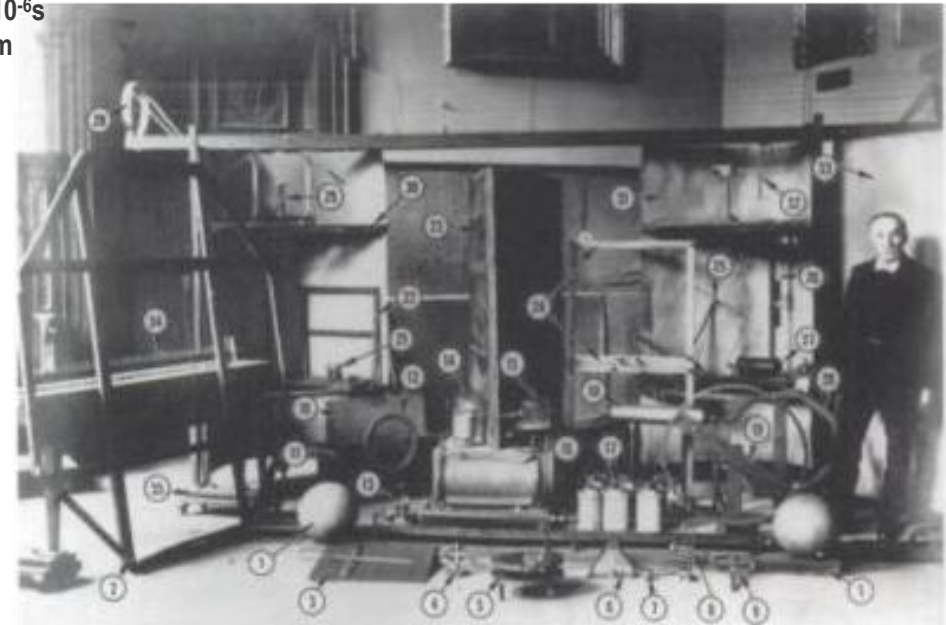
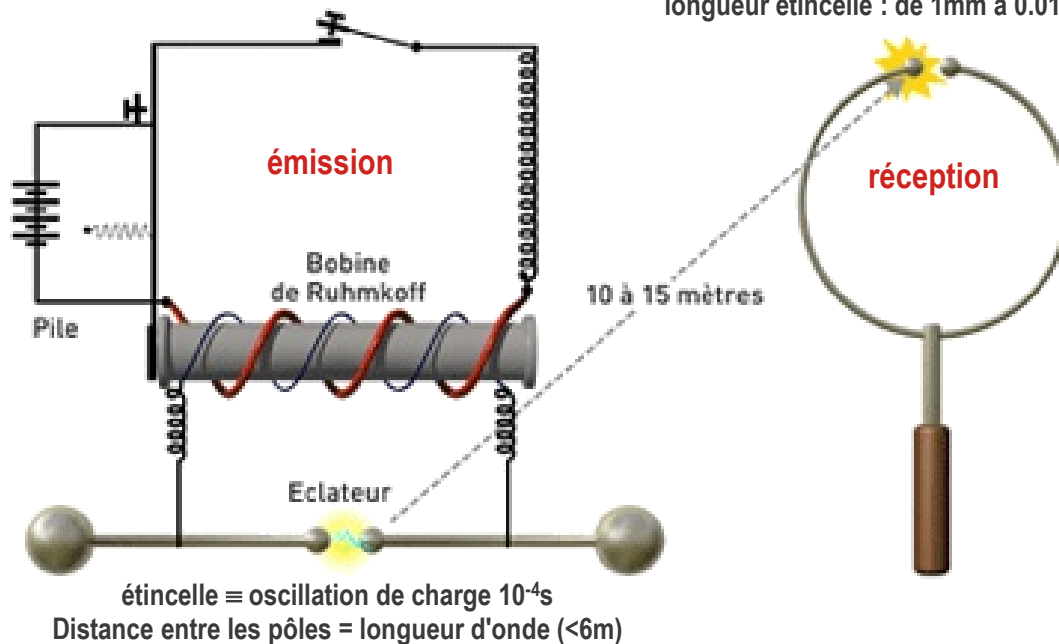



Figure 3. Photograph of equipment used by Hertz. Laboratory equipment, plus apparatus designed by Hertz and built with his mechanic assistant, Julius Amman (shown in Munich in

# En êtes-vous sûr Mr Maxwell ? H. Hertz\* (1886)

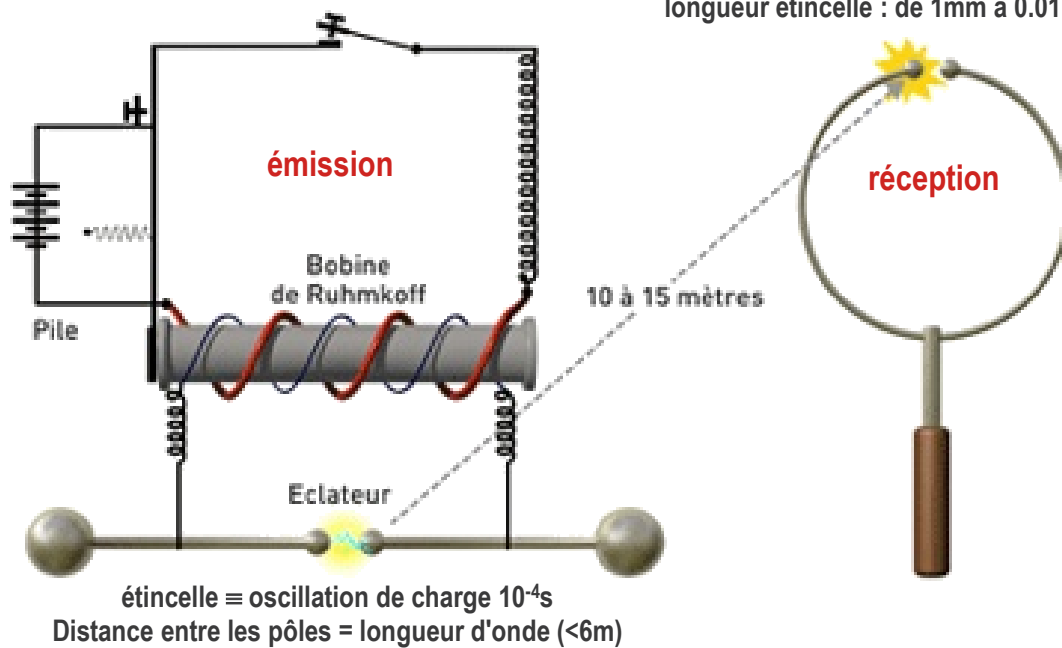
Maxwell: onde E.M. engendrée par vibration charges

\*Oncle du suivant, le Nobel F. Hertz

2 champs  $\vec{E}$  et  $\vec{B}$  oscillants se propageant (éther)

⇒ Construire un diapason électrique (  ≡ onde mécanique 440Hz)

étincelle induite ≡ oscillation parfois  $< 10^{-6}s$   
longueur étincelle : de 1mm à 0.01mm



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

**Il pense son travail sans utilité...Il meurt en 1894,  
sans voir les inventions qui en découlent:  
la radio, la transmission sans fil ...**



# Effet de Hertz, une petite chose bizarre

1887: Hertz

pour mieux voir 2<sup>nd</sup>e étincelle met le récepteur dans boîte noire

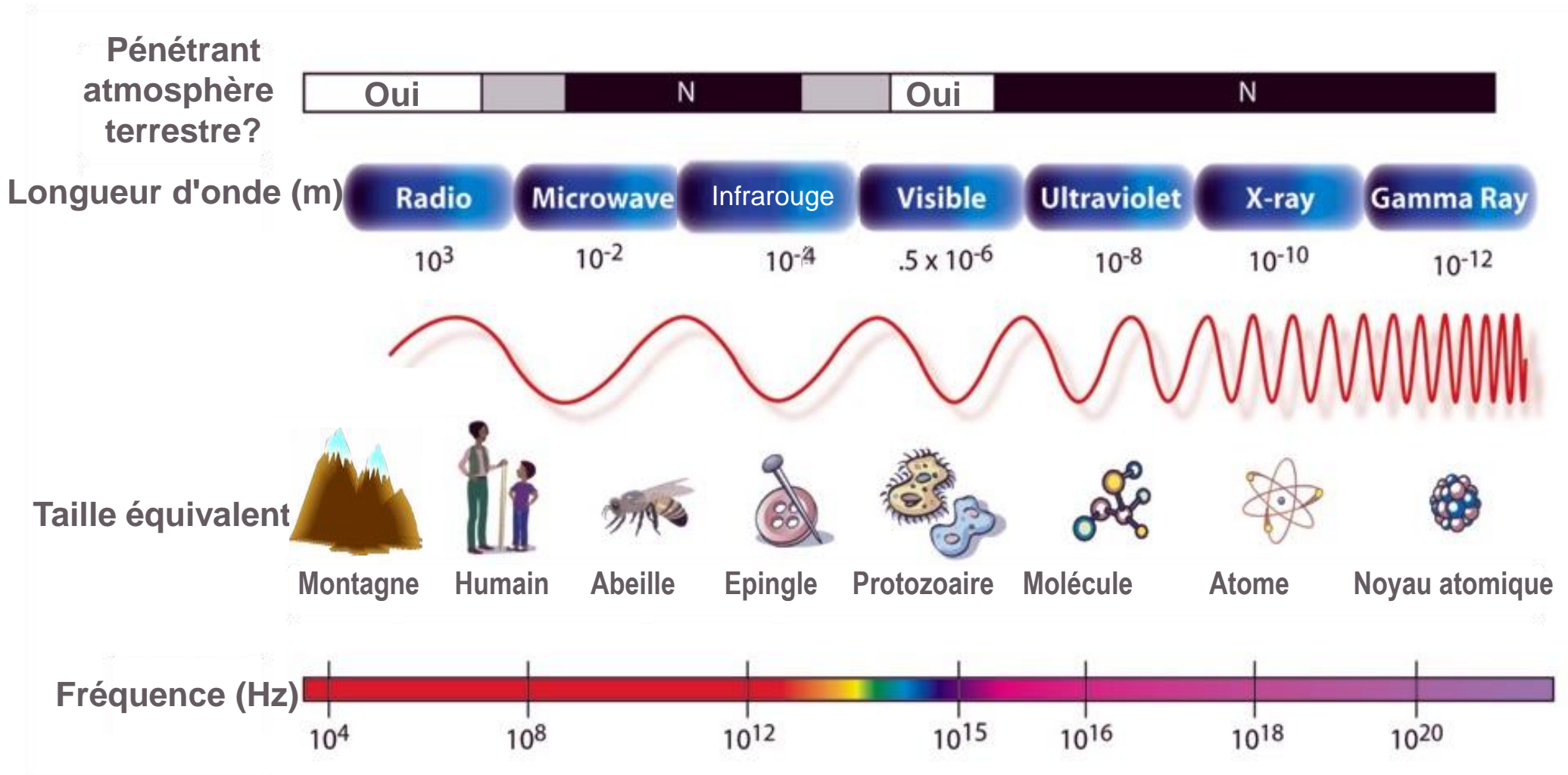


⇒ Voit moins bien !!

Charge/Décharge est favorisée par écran quartz

## Victoire des ondes

# Spectre électromagnétique



Source image: <http://myasadata.larc.nasa.gov/science-processes/electromagnetic-diagram/>

# 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>

# La Mécanique des Ondes ?

Deux révolutions vont naître de ces deux nuages (incompatibilités) de Lord Kelvin:

Entre Thermodynamique et caractère ondulatoire du Spectre de la lumière émise par un corps à l'équilibre thermique

⇒ **Théorie des "quanta" - M. Planck (1900)**

Entre Mécanique rationnelle et Electromagnétisme  
(Equations de Maxwell violent principe Galiléen )

⇒ **Relativité - A. Einstein (1905)**

# Nature de la lumière des corps chauds ?

1854-1858: Kirchhoff

→ rayonnement thermique spectre continu

Tout corps dense chaud émet selon une loi  $f(T, \lambda)$  indépendante de sa forme, etc

→ Invention du CORPS 'NOIR'

La lumière dans le corps noir provient de son seul état thermique

⇒ à l'équilibre thermique: parois et rayonnement thermique à même T

1 boîte avec 1 petit trou



**Corps noir IRC 500**

Etalon Température - IMPAC FRANCE SARL

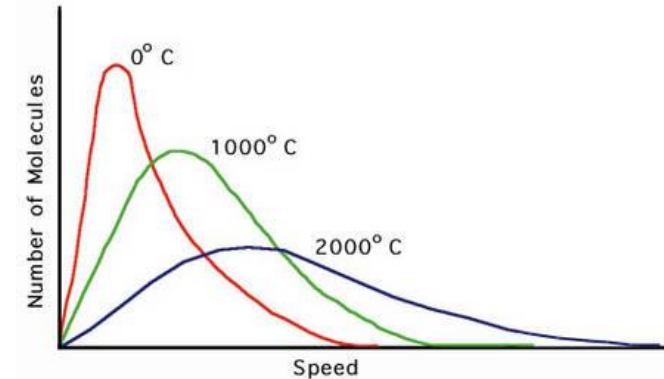
Corps noir universel, portable, avec temps de chauffe et de refroidissement rapide  
utilisation simple sur site, de 50 à 500°C.

# 2 approches irréprochables => 2 résultats différents

1893-1896: Wien

Analogie avec distribution statistique énergie en fct de T

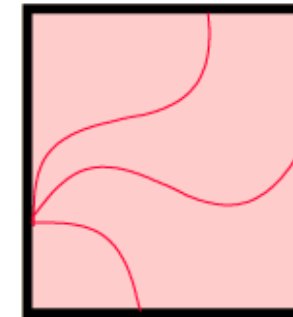
Formule empirique  $f_W(T, \lambda)$



1900: Rayleigh

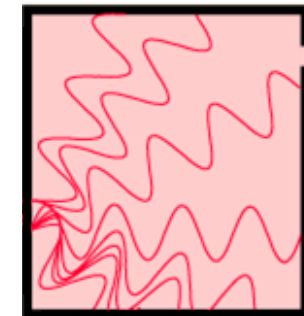
Hyp: Oscillateurs (Maxwell) génèrent l'onde  
Compte les ondes stationnaires par unité volume

Formule issue d'un décompte « exact »  $f_R(T, \lambda)$



# ondes  $\nearrow$  qd  $\lambda \searrow$

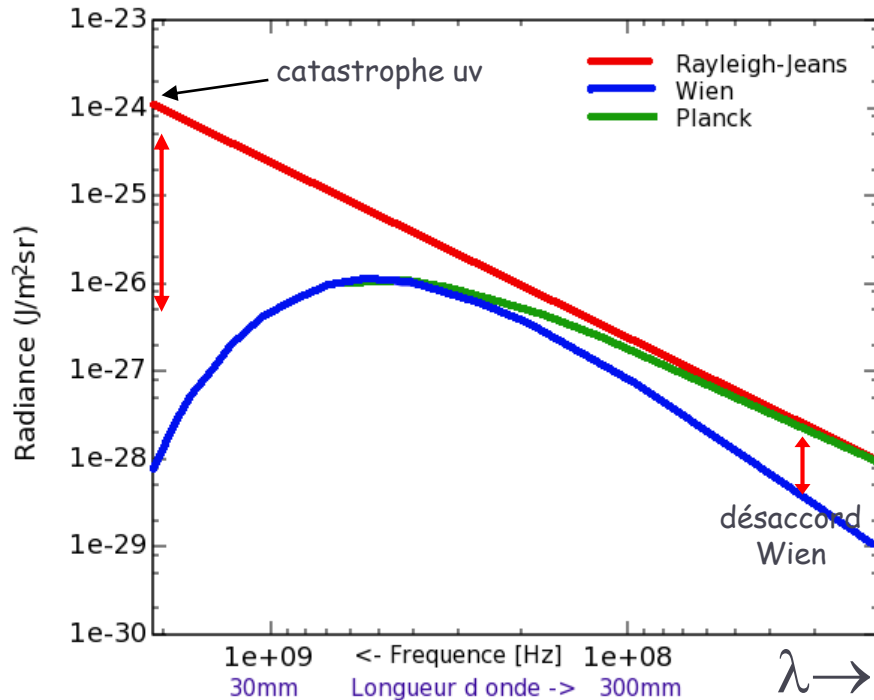
$E = kT/2$  par onde



# 1900: Un petit coup de main

Planck (élève de Kirchhoff)

Analogie entre les deux formules



Ajouter -1 au numérateur Wien

Alors Rayleigh  $\equiv$  Wien corrigé

**SI**

$E = n\varepsilon$ ,  $\varepsilon$  quantum énergie

$\Rightarrow \varepsilon = h \nu$ ,  $\nu = c/\lambda$

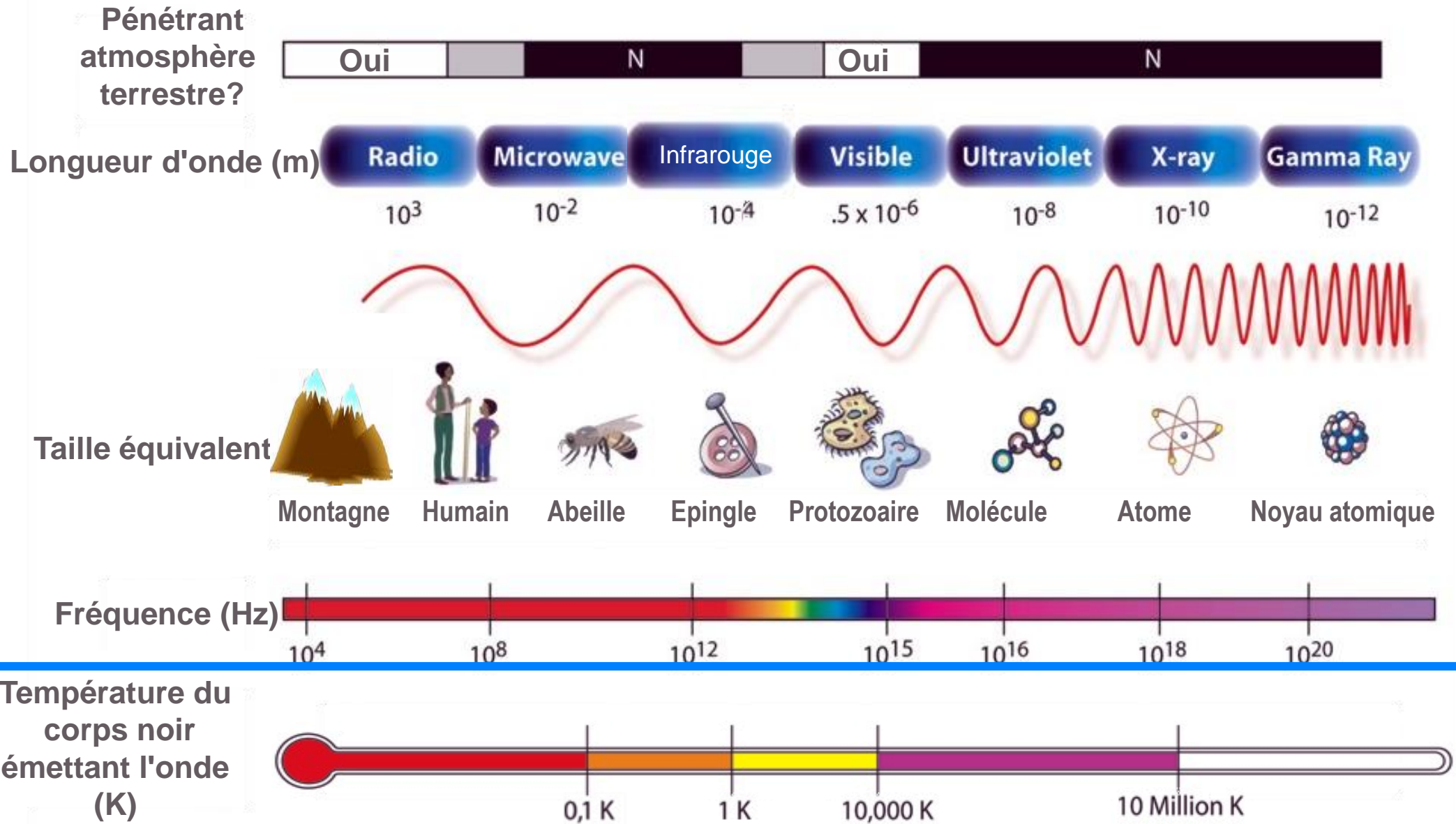
"hilkonstante"  $h = 6.62 \cdot 10^{-34}$  Js

**HYP. PLANCK:** énergie thermique  $\leftrightarrow$  énergie E.M par "quanta d'énergie"

Les ondes EM pas telles des ondes mécaniques....

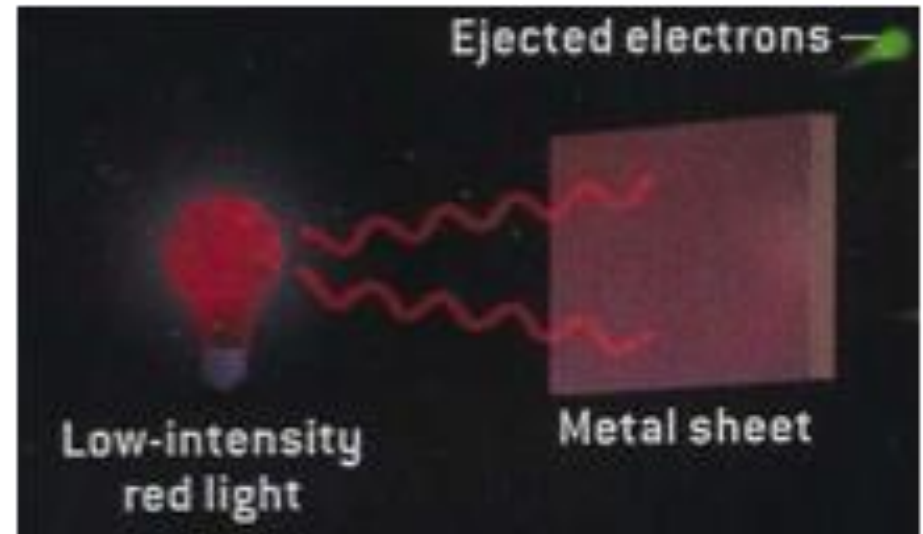


# Spectre électromagnétique et corps noir



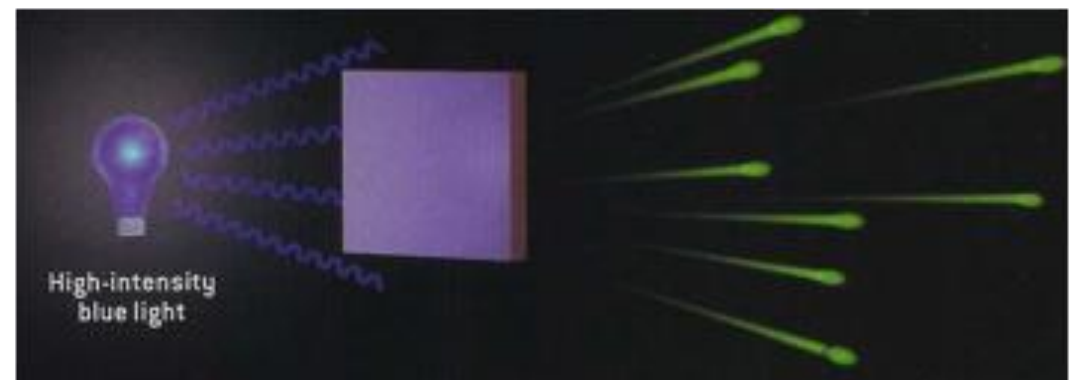
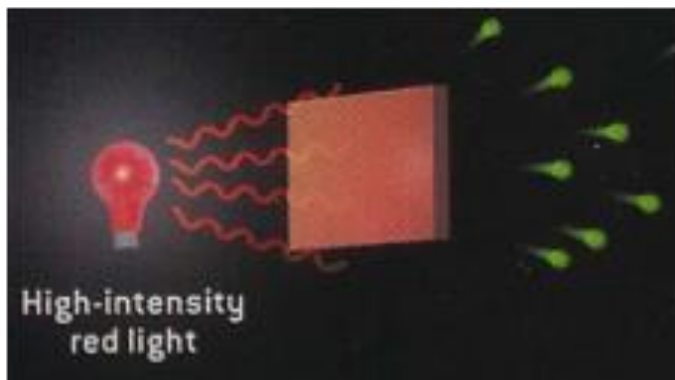
# Effet de Hertz = Effet photoélectrique

1902: Lenard (assistant de H. Hertz)  
Lampe à arc  
Mesure Energie cinétique électrons  $E_e$



Si double Luminosité  
(énergie reçue x2) :  
 $E_e$  inchangée, mais nombre d'e x2

quand  $\lambda \searrow$  :  $E_e \nearrow$



Onde Maxwell (classique) : énergie = Luminosité ne dépend pas de  $\lambda$

# 1905: Année d'Einstein (4 publications)

## Einstein:

Effet photoélectrique observé ne s'explique pas par accumulation de chaleur mais par chocs entre corpuscules,

Echanges énergie entre matière et onde EM sont le fait d'un **corpuscule** de lumière (photon) porteur de l'énergie des quanta de Planck  
Rayonnement lumineux  $\equiv$  flux de particules  $E_\nu = h\nu$ , où  $\nu = c/\lambda$

## Le retour du corpuscule de lumière

### Nobel pour Einstein en 1921

# Dualité Onde Corpuscule

1924 Hyp. de De Broglie en thèse:

La lumière (**onde** e.m.) présente un aspect **corpusculaire** (photons)

Réciproquement

Les **corpuscules** (e.g. e-, p, n...) ont un aspect **ondulatoire**

→ Longueur d'onde de De Broglie:

$$\lambda = h/p \text{ avec } p = \text{impulsion}$$

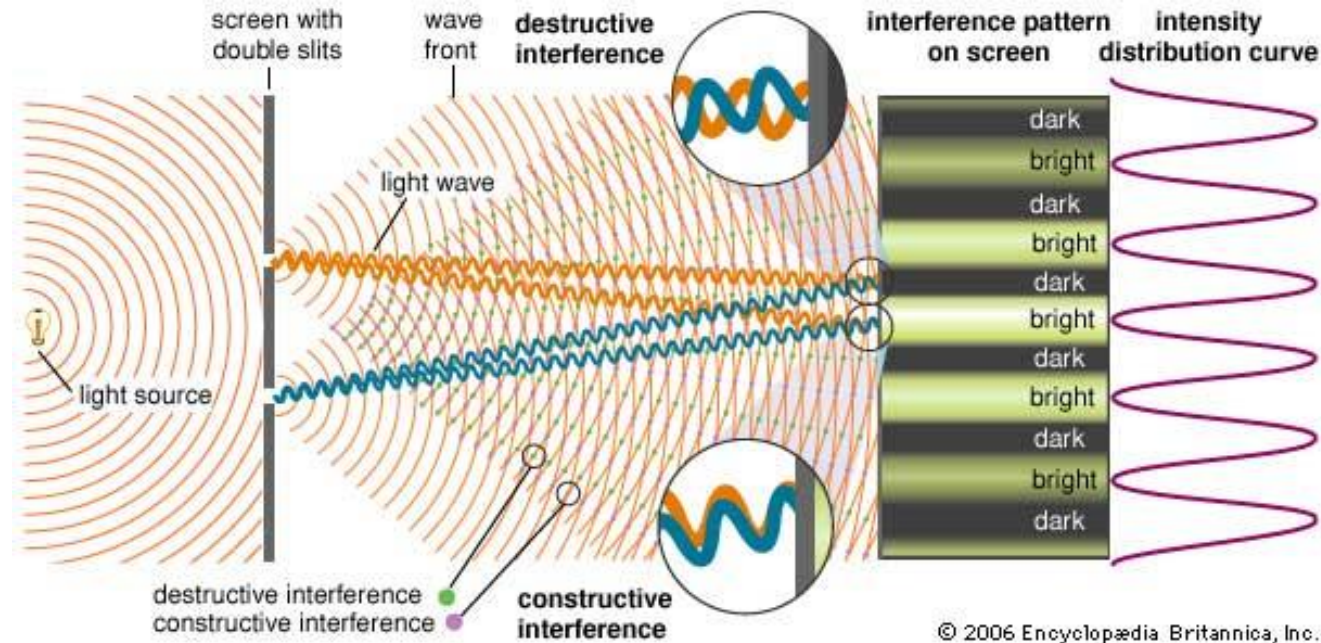
→ **petites échelles de distance** (physique 'microscopique')

particules  $\approx$  ondes  $\Leftrightarrow$  fin de la localisation, 'trajectoire' non unique

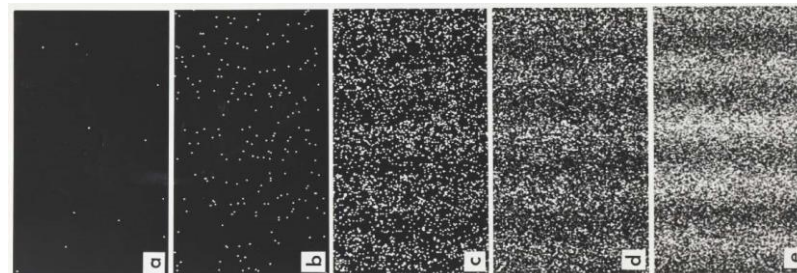
**Fin du déterminisme**

# Expérience des 'trous d'Young'

Expérience classique en optique (Young 1830)  
preuve de la nature ondulatoire de la lumière



Avec des électrons : apparition progressive des franges



# Expérience de Franck et G. Hertz: 1914

Mesurer précisément le potentiel ionisation du Hg :  $E_{\text{ion}}$

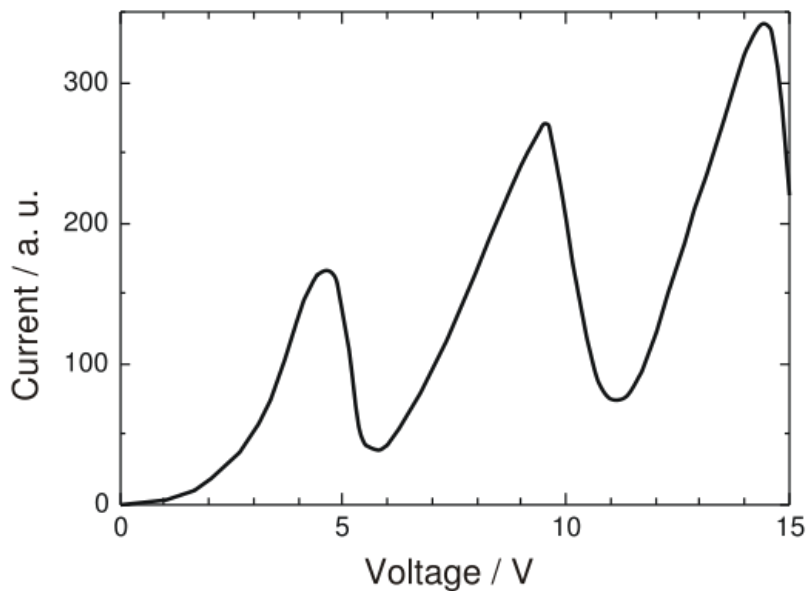
$e^-$  accélérés dans un tube rempli vapeur de mercure

$\Rightarrow e^-$  ont des chocs avec Hg:

- Élastiques ou

- Inélastiques si ils cèdent de l'énergie aux atomes Hg.

Ils mesurent  $E_e$  au bout du tube.



Plusieurs fois même phénomène:  
#  $e^-$ :  $E_e \nearrow$  (élastique) jusqu'à  $E_{\text{ion}}$  puis  
 $E_e \searrow$  inélastique,  $e^-$  ont cédé  $E_{\text{ion}}$ .

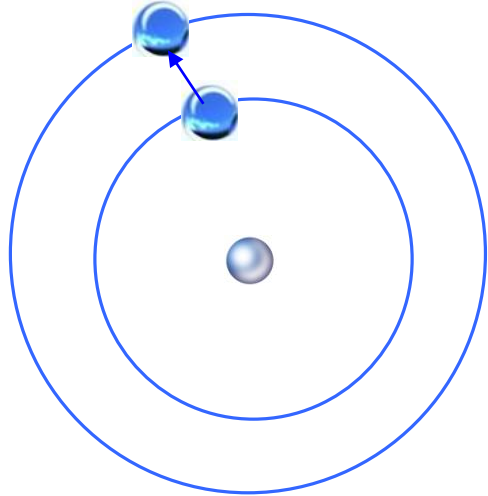
Donc: E ionisation = 4,9V

Ils publient...

**C'est faux !**

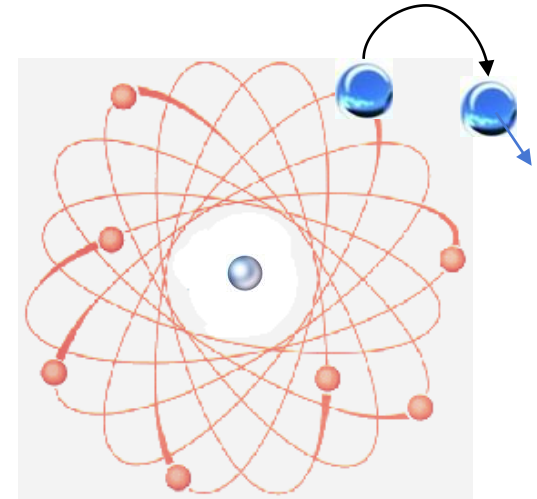
# Pas ionisation mais excitation:

Eh, oui: potentiel ionisation Hg =  $10,4\text{eV}$ ...



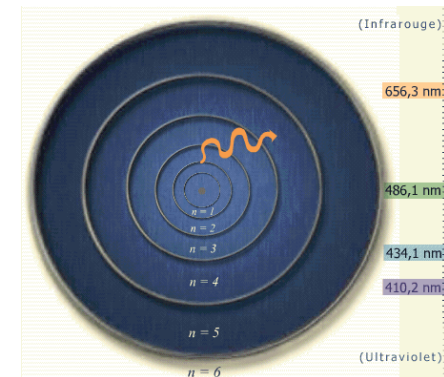
Ils n'ont pas mesuré l'énergie d'éjection d'un  $e^-$  dans atome version Rutherford  $\Rightarrow$

$\Leftarrow$  mais celle pour placer un  $e^-$  une orbite supérieure (excitation)



$\Rightarrow \exists$  existe des orbites d'énergies différentes:

**Confirmation atome de Bohr:  
Les électrons de l'atome  
ont des énergies quantifiées:**



Désexcitation : Processus inverse de l'effet photo-électrique (photon  $\rightarrow e^-$ )  
désexcitation  $e^- \rightarrow$  émission photons (du X au visible)

# Quantification(s)

	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**

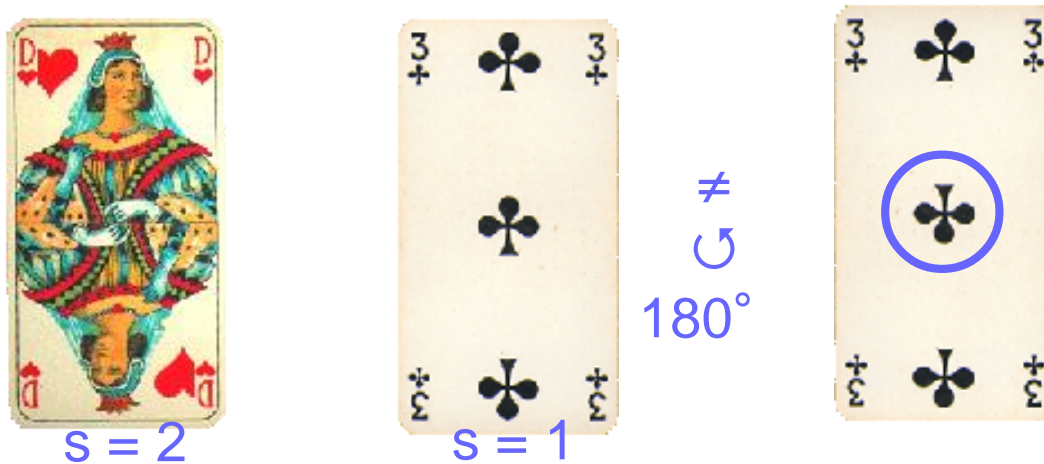


# Nombre quantique vs symétrie: exemple le spin

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






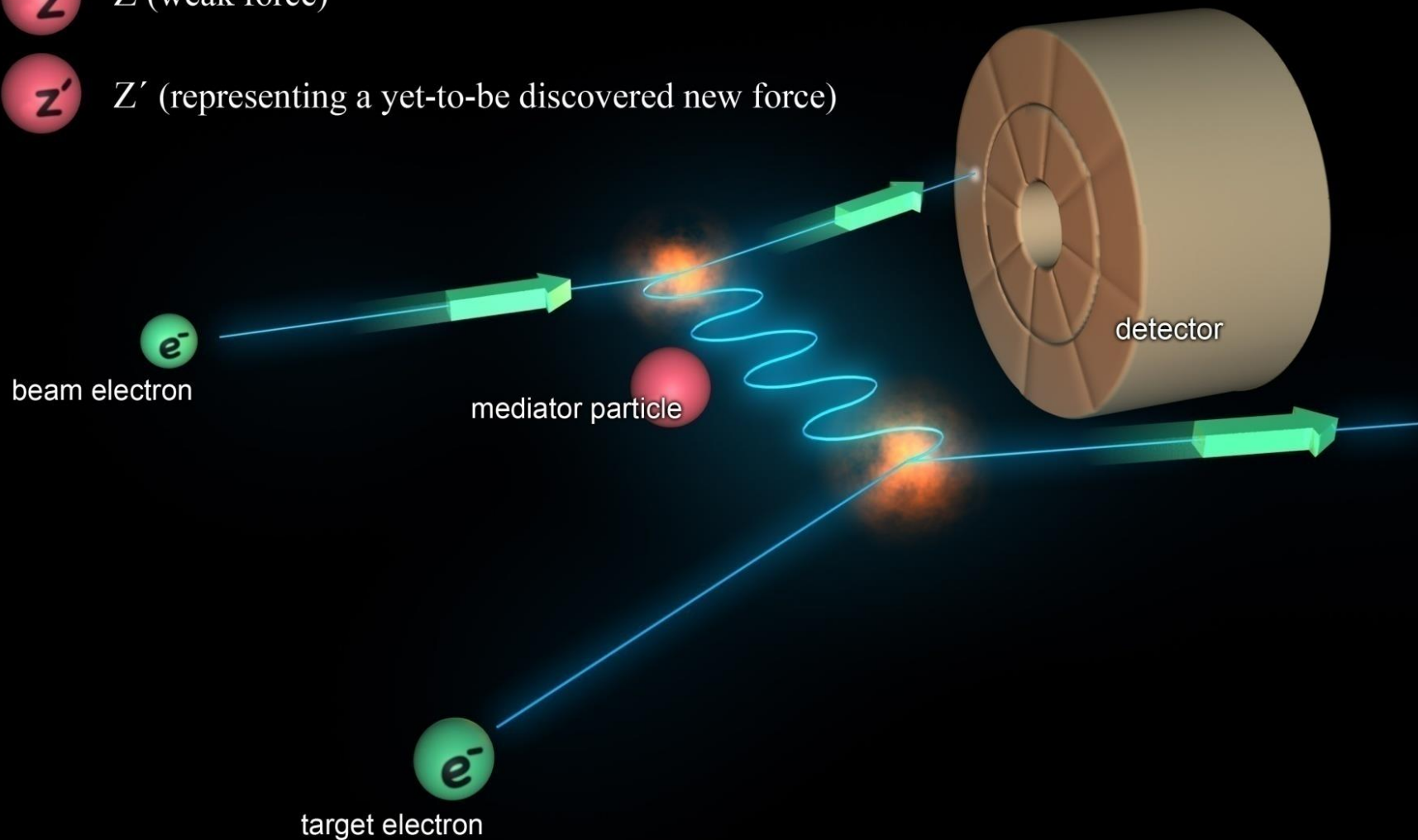
$s = 1/2 \Rightarrow$  rotation de 2 fois  $360^\circ$   
pour retrouver l'objet  
n'existe pas à notre échelle !

Pourtant toute une famille de particules, les **fermions**, ont un **spin  $1/2$**  entier, les nucléons (composites: protons, neutrons), électrons, neutrino, quarks. L'autre famille, les **bosons**, eux, ont un **spin entier** (ex: 0 higgs, 1 photon)

# 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  $\equiv$  particules médiatrices

**IN2P3**  
INSTITUT NATIONAL DE PHYSIQUE NUCLÉAIRE  
ET DE PHYSIQUE DES PARTICULES

Les quatre 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	$\sim 1$	gluons	noyau, nucléons
ÉLECTROMAGNÉTIQUE	$\sim 10^2$	photons	cortège électronique de l'atome, lumière, chimie
FAIBLE	$\sim 10^4$	bosons $Z^0, W^+, W^-$	radioactivité $\beta$ énergie solaire
GRAVITATION	$\sim 10^{38}$	graviton ?	pesanteur systèmes planétaires

T10