

# Introduction à la Physique Moderne : les notions indispensables

**I. Le fil de la lumière : I. Deloncle**

**II. Relativité : Xavier Garrido**

# I. Le fil de la lumière : I. Deloncle

# En un temps un mouvement

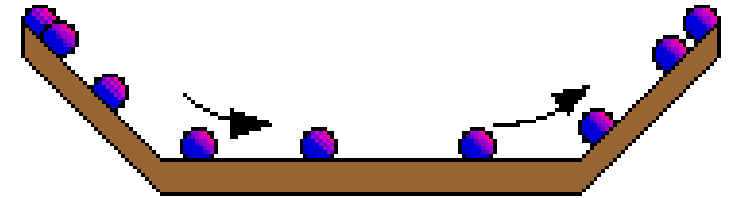
Entre 1602 et 1632: Galilée fonde la physique classique

- ▶ mathématisation de la nature
- ▶  $V, t$  variation mouvement au cours du temps

Principe "faible" d'inertie (Pfl) :

Rien n'est nécessaire pour conserver  $v$

(Aristote avait encore tort..)



Principe de relativité Galiléenne :

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

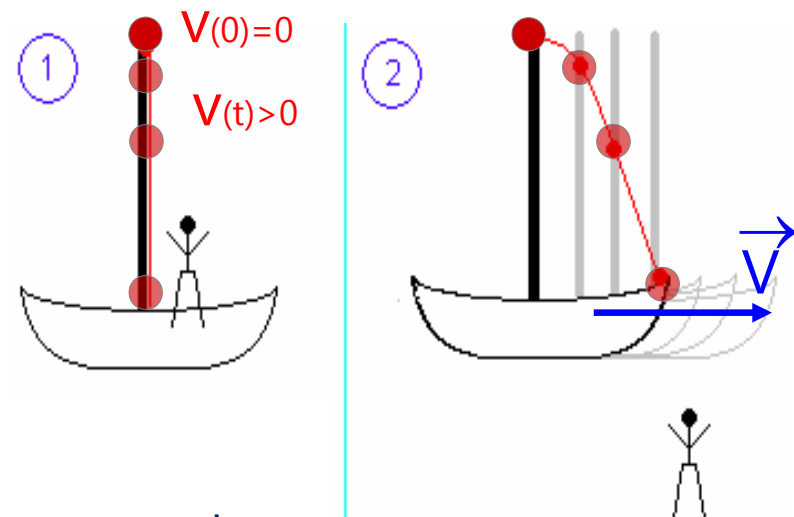
( $v = cste$ )  $\equiv$  ( $v = 0$ ) c'est RELATIF.

$\Rightarrow$  Pas de repos absolu

Loi de Composition Vitesse

$$\text{Cas 1 : } \vec{v}_{\text{bateau}/1} = \vec{0} \text{ et } \vec{v}_{\text{balle}/1} = \vec{v}(t)$$

$$\text{Cas 2 : } \vec{v}_{\text{bateau}/2} = \vec{V} \text{ et } \vec{v}_{\text{balle}/2} = \vec{v}(t) + \vec{V}$$



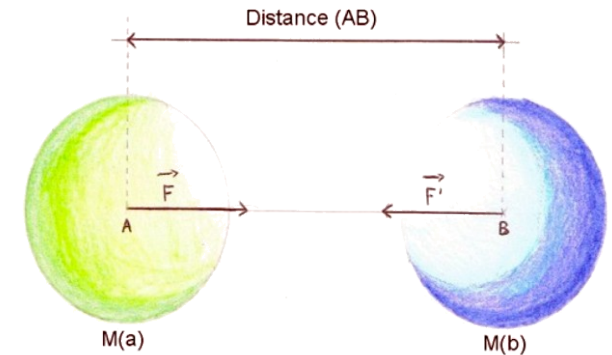
Rq: Galilée essaiera de mesurer la vitesse de la lumière avec une lanterne

# 1687 Newton : Force (F) est Accélération (a)...

- ▶ calcul infinitésimal: v vitesse, a accélération, instantanées
- ▶ Forces

## Principe actions réciproques (interaction)

F instantanées, à distance, intensité en  $1/d^2$   
⇒ Loi de la gravitation (attraction universelle)  
sans éther



## Principe Fondamental Dynamique (PFD)

$$\Sigma \vec{F} = m \vec{a}$$

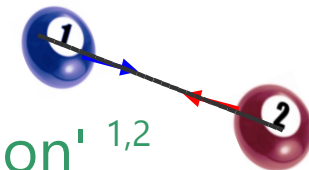
$$\Sigma \vec{F} = \vec{0} \Leftrightarrow \vec{V} = \vec{C}_{st}$$

$$\Rightarrow \vec{P}_G = \Sigma m_i \vec{v}_i = \vec{C}_{st}$$

$$\Rightarrow \Delta \left( \frac{1}{2} m_G V_G^2 \right) = W(\Sigma \vec{F}) = 0$$

Pour un mobile sur un plan  $\Leftrightarrow$  Pfl Galilée

=> Conservation de la quantité de mvt 'impulsion'<sup>1,2</sup>



=> Conservation énergie cinétique\*<sup>2</sup>

## Corollaire: Principe de Relativité

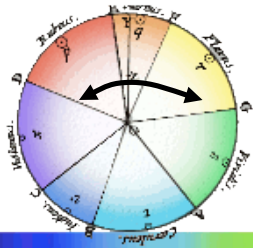
2 référentiels Galiléens sont identiques pour la physique  $\Leftrightarrow$  Eq. PFD identique

1 Descartes 1644, 2 Huygens 1669, \* Énergie Appellation Young 1807

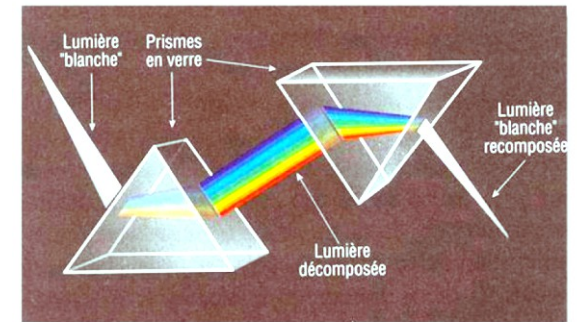
# Lumière: 17<sup>ème</sup> siècle, une 1<sup>ère</sup> bataille fait rage

## Deux conceptions et leurs défenseurs principaux

### 1) Newton 1665-1704 :



- couleur est constitutive de la lumière et ne provient pas du prisme
- Lumière = 7\* corpuscules (taille, masse) => 7 couleurs 'primaires'



### Réfraction corpuscule Newton

=> vitesse dans eau > vitesse dans air

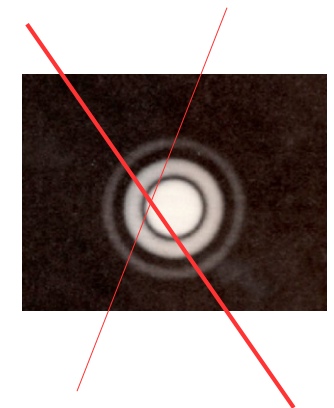
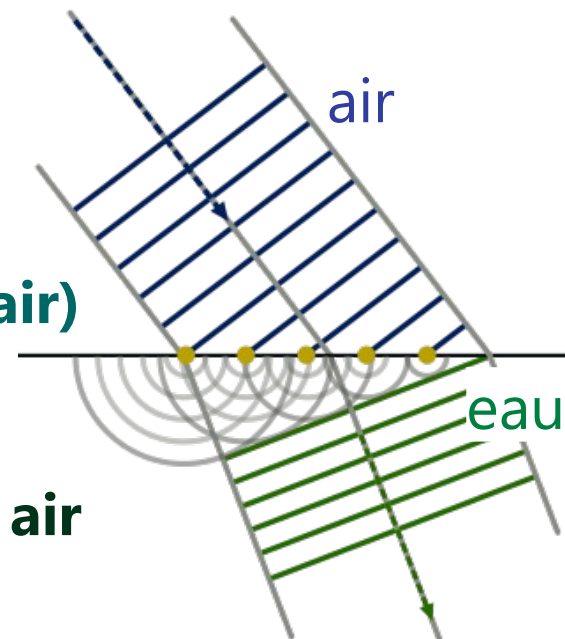
### 2) Huygens 1678 :

Lumière = onde formée d'ondelette  
contact front - nouveau milieu (éther/air)

=> ondelette sphérique

Réfraction onde Huygens

=> vitesse dans eau < vitesse dans air

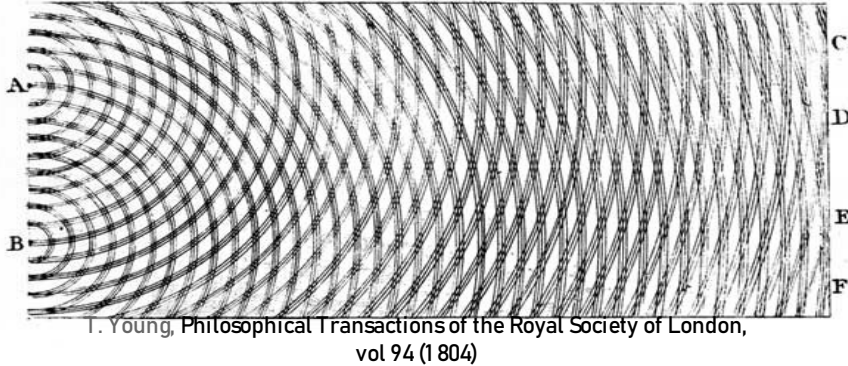


7\*: en accord avec ordre du monde (selon les grecs 7 tons en musique, astres dans le ciel, jours de semaine), surtout musique

# L'hallali : de Young à Foucault...

## 1803: Thomas Young

deux fentes zones sombres (creux) et brillantes (crêtes)



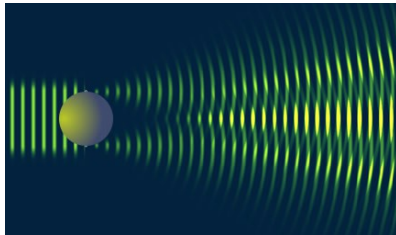
Interférence



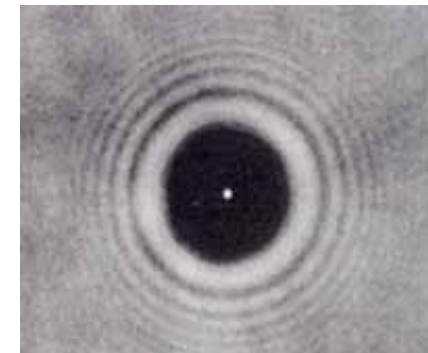
Corpuscules avec effet de bords (Newton): motif régulier après collisions !!!????

## 1815-1817 : Fresnel

=> Poisson



Lumière au centre d'une ombre ?



⇒ Oui!  
Arago

## 1850 Foucault

Mesure  $v_{\text{air lumière}} > v_{\text{eau lumière}}$

Newton avait tort, Huygens raison

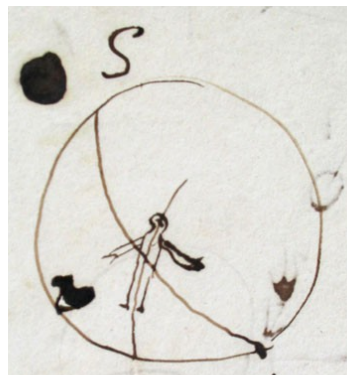
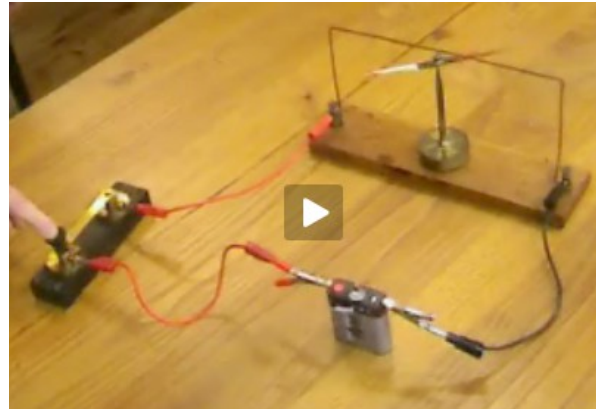
**Des ondes mais de quelle sorte ? Quid de cet éther luminifère ???**

# Deux mondes parallèles, puis...

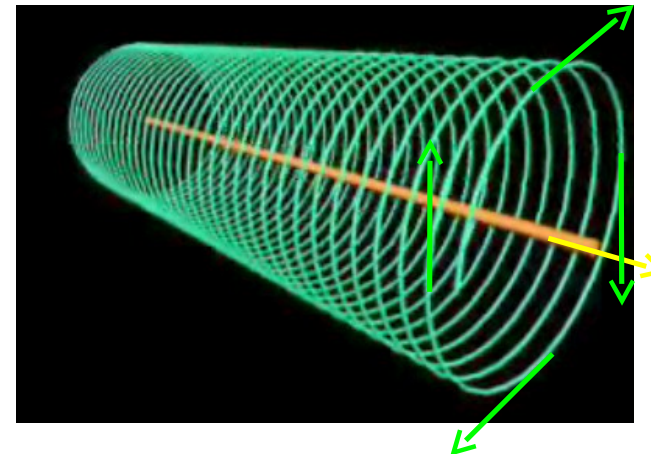
## Lien entre monde magnétique et électrique

1820 Ørsted :

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



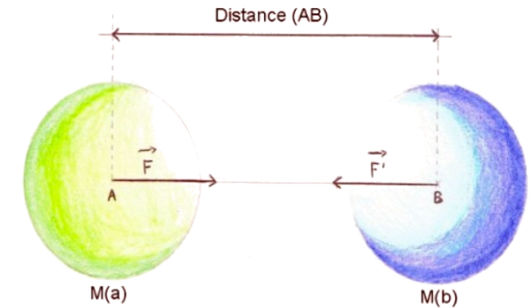
1820 Ampère



# Pas de parallèle, plutôt orthogonal !

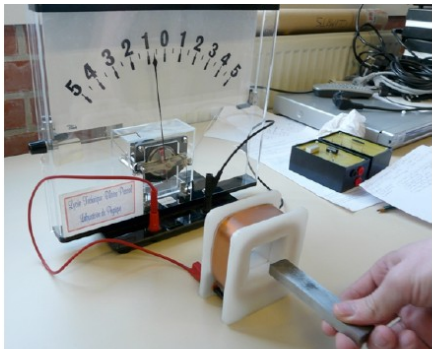
## Newton:

- actions réciproques
- Forces instantanées, à distance, intensité en  $1/d^2$ , issues de prop. statiques telles masse (gravité)  
ex : Charge électrique (force électrostatique, 1785 Coulomb)

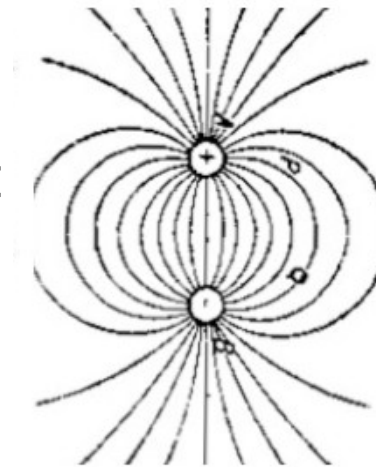


**Mais ici : force pas parallèle  
plutôt perpendiculaire...???!!!**

## 1821-31 : 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



# Ondes : le retour

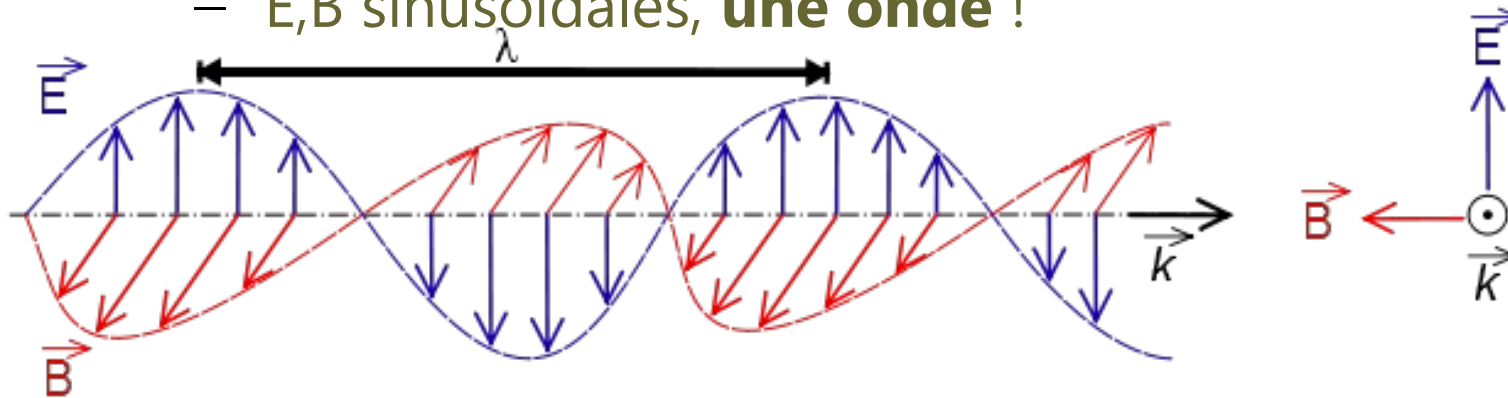
**1864 Maxwell** On the Faraday's lines of Force

Equations du **champ électromagnétique** ( $\vec{E} \perp \vec{B}$ ) et d'une **Force EM**

- charges (statique) et/ou variat° de  $\vec{B}$  ( $\vec{B}(t)) \Rightarrow \vec{E}$
- courant (dynamique) et/ou variat° de  $\vec{E}$  ( $\vec{E}(t)) \Rightarrow \vec{B}$

## Si ni courant ni charge ?

- Equation d'une **corde vibrante** (Alembert)
- $\vec{E}, \vec{B}$  sinusoidales, **une onde !**



( $\lambda = cT = c/\nu$ ,  $\lambda$  longueur d'onde,  $T$  période,  $\nu$  fréquence)

$v_{(\text{ether})} = \text{cste (milieu)} = 310\,740\,000 \text{ m/s} \approx v_{\text{lumière}} \text{ mesurée}$

**$\Rightarrow$  La lumière est une onde électromagnétique (dans éther ???)**

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

Maxwell: onde E.M. engendrée par vibration charges

⇒ Construire un diapason électrique (  onde mécanique 440Hz)

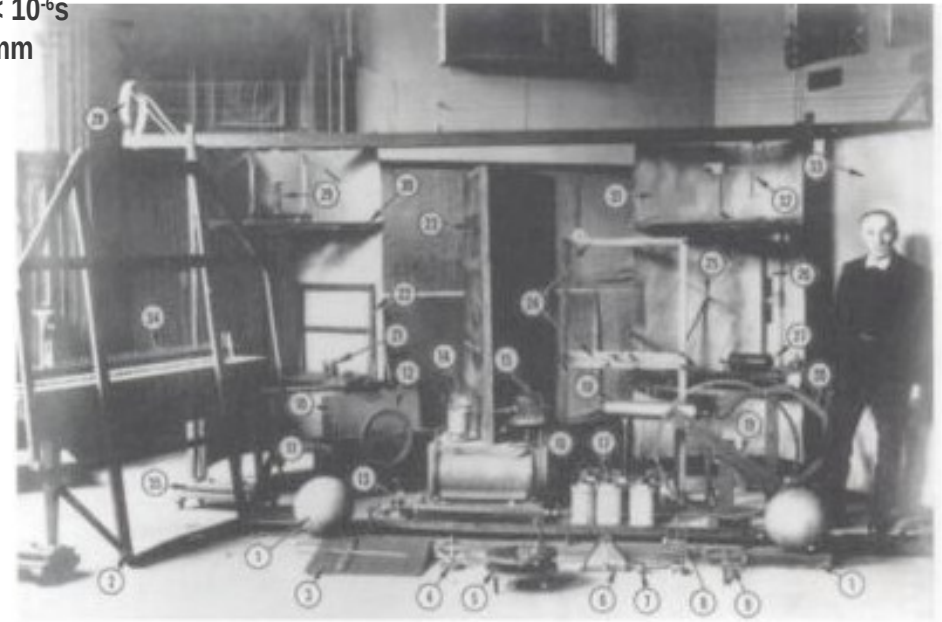
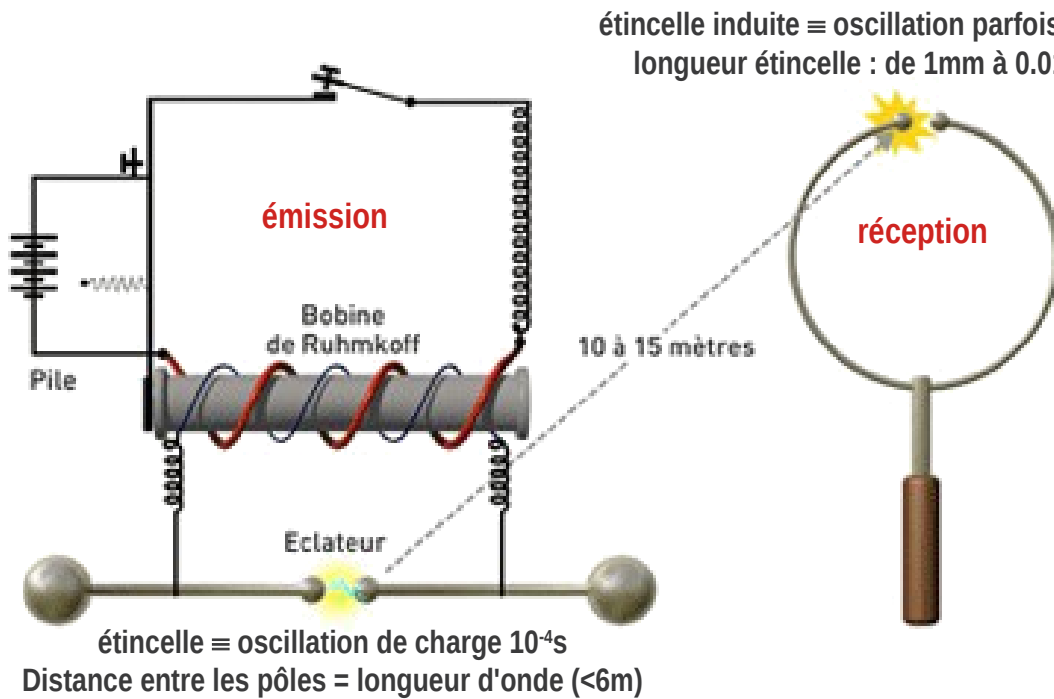


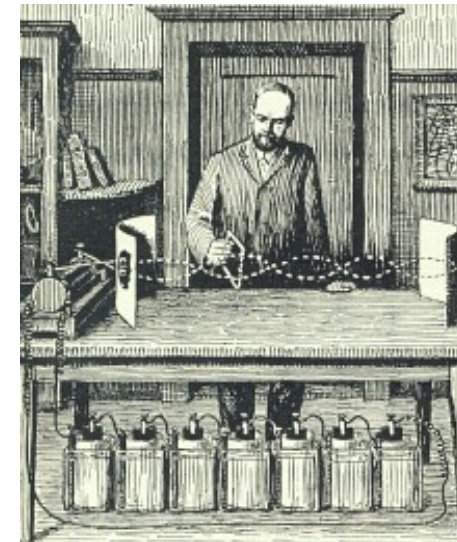
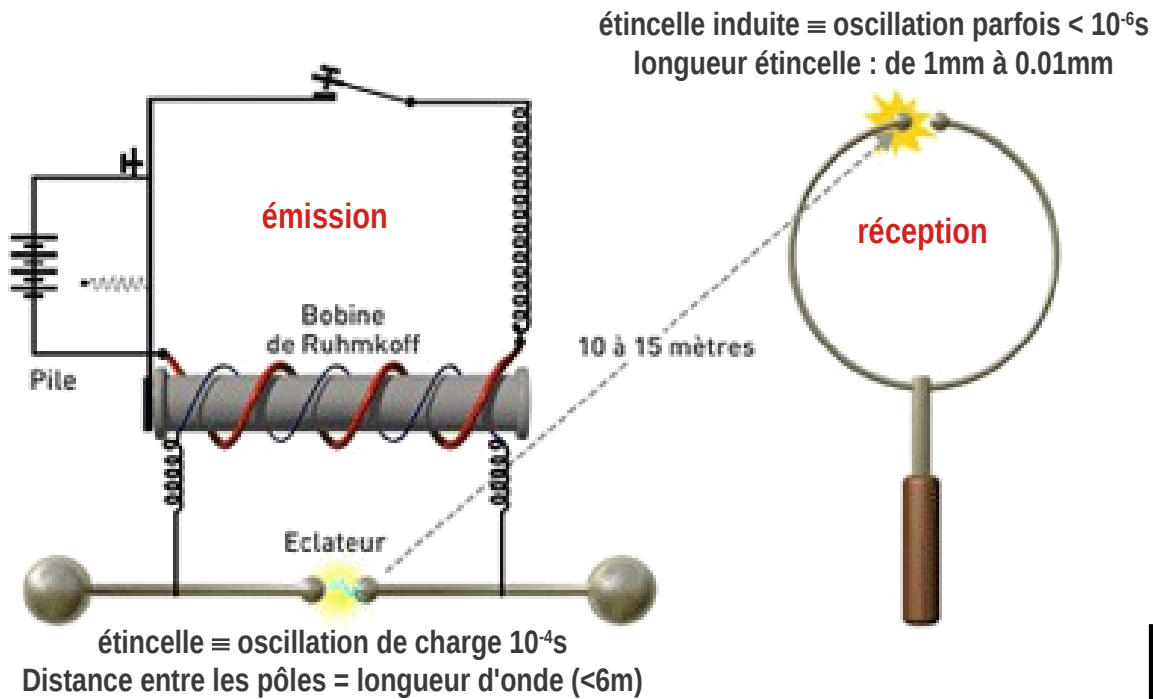
Figure 3. Photograph of equipment used by Hertz. Laboratory equipment, plus apparatus designed by Hertz and built with his mechanic assistant, Julius Amman (shown in Munich in

\*Oncle du suivant, le Nobel F. Hertz

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

Maxwell: onde E.M. engendrée par vibration charges

⇒ Construire un diapason électrique (  onde mécanique 440Hz)



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 ...

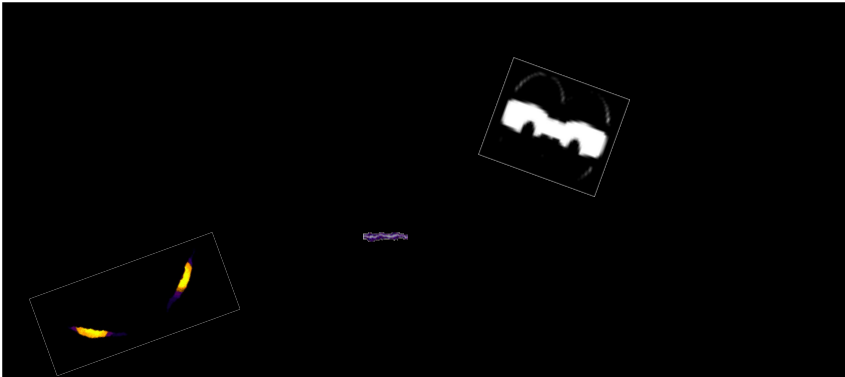
**Il y a bien des ondes EM, elles peuvent être émises, reçues et telles la lumière être réfléchies, réfractées, polarisées....**

\*Oncle du suivant, le Nobel F. Hertz

# Effet de Hertz

1887

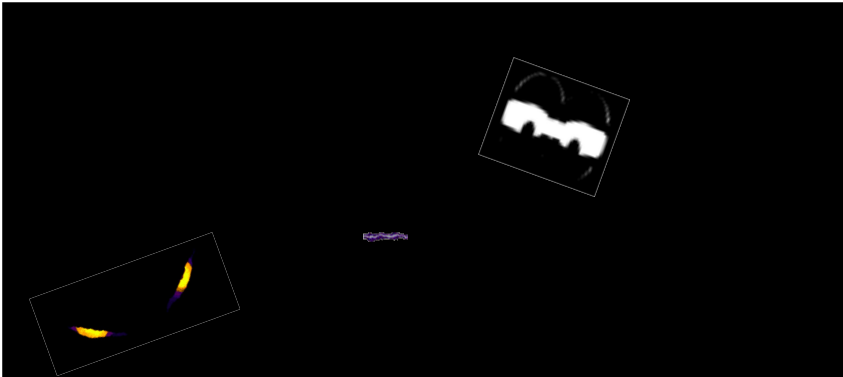
Pour mieux voir 2<sup>nd</sup>e étincelle  
⇒ récepteur dans boîte noire



# Effet de Hertz

1887

Pour mieux voir 2<sup>nd</sup>e étincelle  
⇒ récepteur dans boîte noire



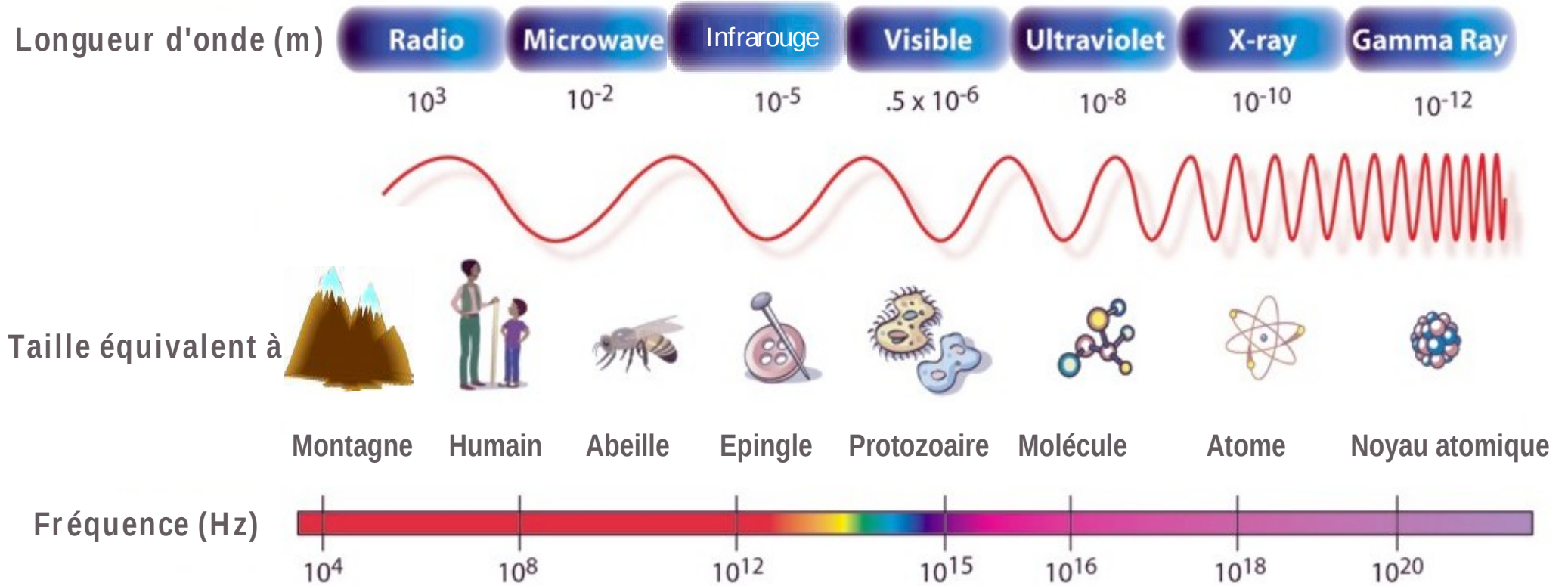
...et il la voit moins bien : +rare, + petite...!!!  
boîte fait écran entre émetteur et récepteur  
verre, mica, gaz houille ⇒ diminution  
quartz ⇒ retour de l'étincelle  
⇒ Charge/Décharge est favorisée par les UV  
Publie sans explications et retourne à Maxwell

Pourtant, 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**

# 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"...

qui va bien s'obscurcir....



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

# La mécanique des ondes

Mais 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 qui violent principe Galiléen )

⇒ **Relativité - A. Einstein (1905)**

\*aujourd'hui on dirait unifiées



# Nature de la lumière des corps chauds

1854-1858: Kirchhoff

- Tout Corps dense (solide) chaud émet un spectre continu selon  $f(T, \lambda) = ???...$  loi indépendante de sa forme, de sa nature, etc.
- Invention du **CORPS 'NOIR'**

Absorbe 100% des radiations émises (0 réflexion, 0 transmission) .  
La lumière émise provient de son seul état thermique

⇒ à l'équilibre thermique:  
parois et rayonnement thermique à T  
Energie reçue = énergie émise

1 boîte avec 1 petit trou



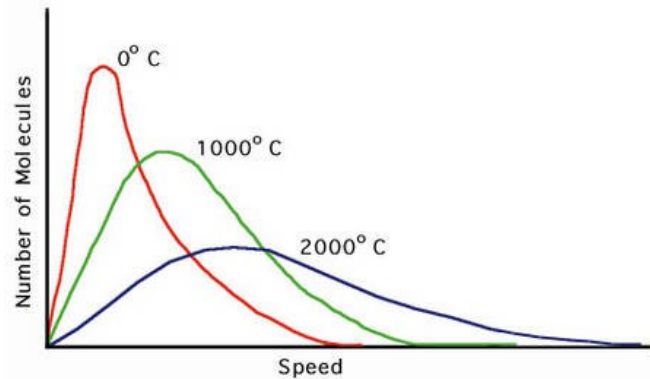
## Corps noir IRC 500

Etalon Température - IMPAC FRANCE SARL

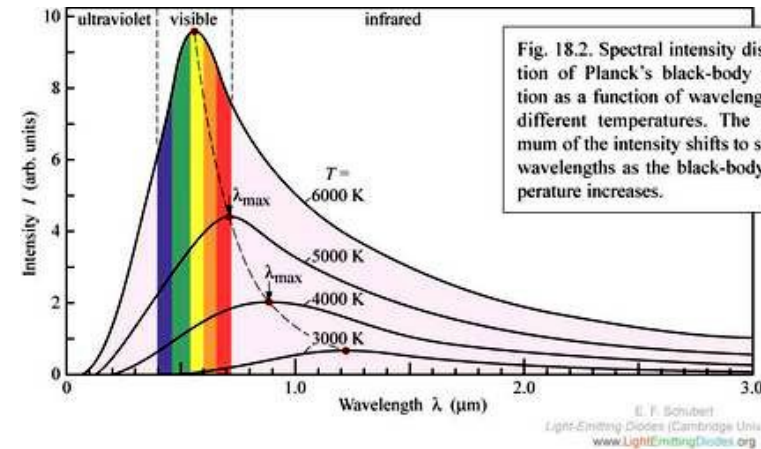
Corps noir universel, portable, avec temps de chauffe et de refroidissement rapide | utilisation simple sur site, de 50 à 500°C.

# Une première approche et premier modèle

1896: Wien



Présente forte similitude avec



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

Loi de distribution vitesses en fct de T dans gaz parfait (molécules sans interactions) (Maxwell 1860/ Boltzmann 1872)

=> loi du rayonnement de Wien  
formule empirique  $f_{\text{Wien}}(T, \lambda)$   
avec des constantes ad hoc

# Une seconde approche et un modèle

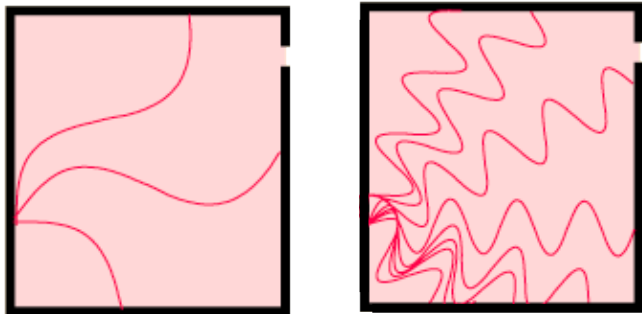
1900: Rayleigh

## Onde de Maxwell vs équilibre thermodynamique:

Des oscillateurs indpts (Maxwell, Hertz) génèrent ondes, couplés au mode stationnaire du rayonnement EM, les ondes s'annihilent sur les parois :  
1 onde reçue => 1 onde émise par oscillateur (diffusion)

## Calcul du nombre N d'ondes par unité volume

N ondes  $\nearrow$   $q d \lambda \searrow$   
( $Q d \lambda \rightarrow 0 \dots A i e !!!$ )



Chaque onde possède énergie moyenne des particules dans gaz à T (oscillateurs indpts)

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

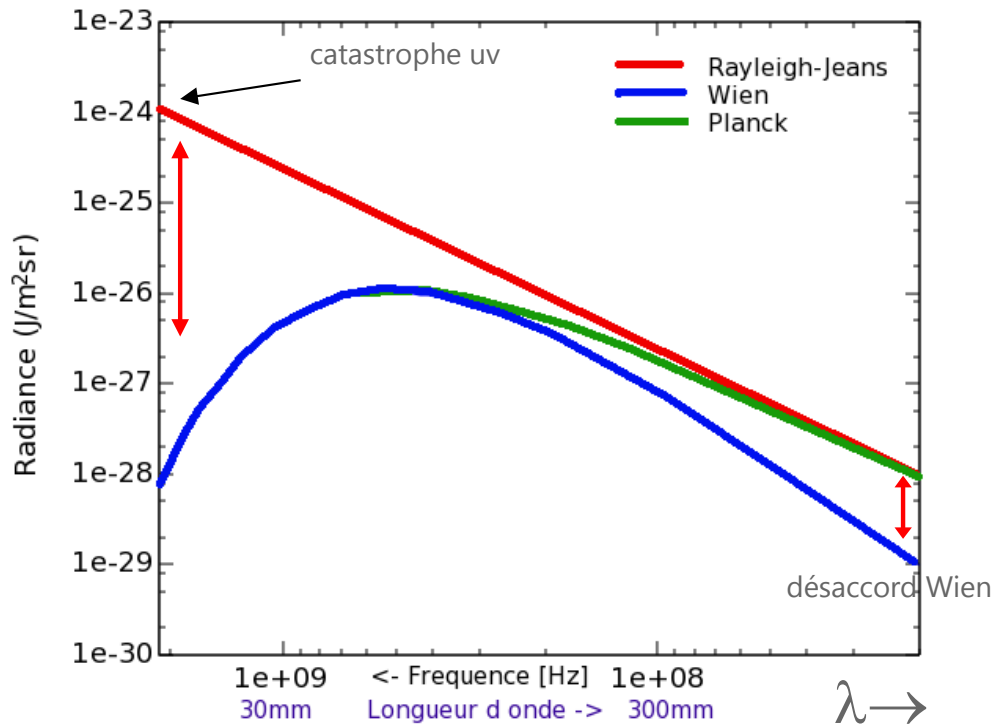
**Bon accord avec les mesures pour  $\lambda$  gd => le rayonnement thermique est bien de nature EM, et les oscillateurs sont confirmés...**

**MAIS Catastrophe ultraviolette pour  $\lambda$  petit...**

# Révolution : un corps noir quantique

1900 Planck (élève de Kirchoff)

Et puis ces deux formules ne coïncident pas...=> deux corrections



1)  $\lambda \gg 1$ :

ajouter -1 dénominateur Wien

2)  $\lambda \ll 1$ :

pour que Rayleigh = Wien corrigé  
il faut poser

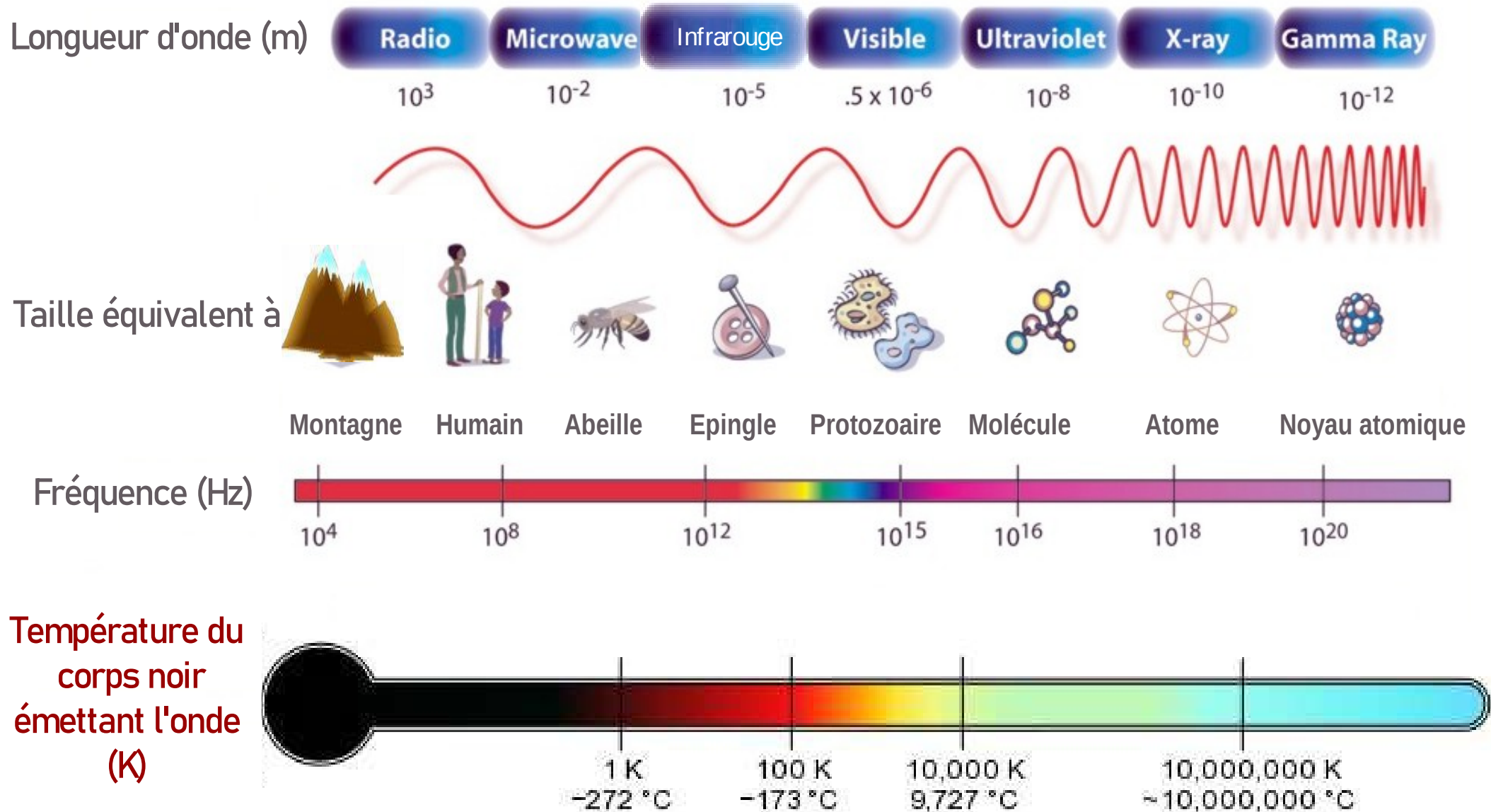
$$E = n\varepsilon \text{ pour un mode } n \\ \text{avec } \varepsilon = h\nu, \nu = c/\lambda$$

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

h "Hilfkonstante" =  $6.62 \cdot 10^{-34}$  Js. minuscule. Mesure de Millikan 1916

**Ondes EM sauvées, juste pas des ondes mécaniques dans les échanges ?**

# Spectre électromagnétique et corps noir



# Effet de Hertz = Effet photoélectrique

1902: Lenard (assistant de H. Hertz)

Dispositif :

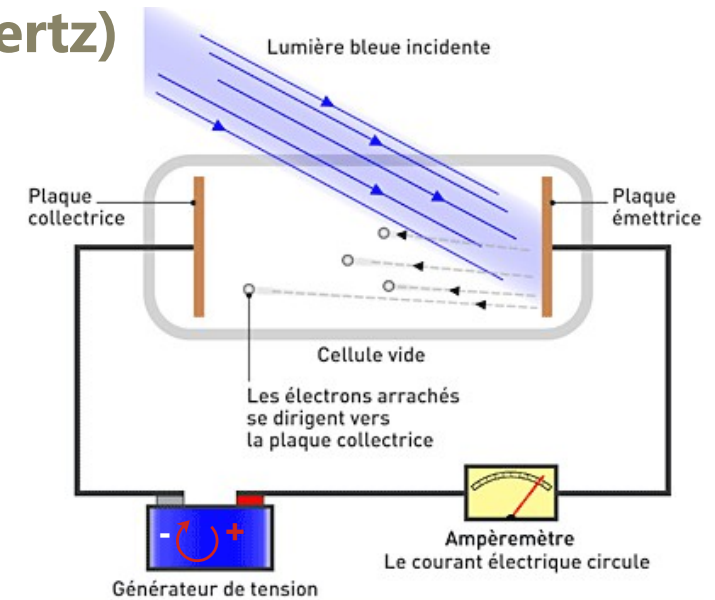
\* Lampe à arc Luminosité (énergie émise) 1  $\nearrow$  1000

\* Générateur de tension, variateur

Il mesure :

-  $I_{col}$  (soit le # d' $e^-$  atteignant collectrice)

-  $V_{stop}$  qui arrête les  $e^- \Rightarrow$  énergie cinétique  $e^-$

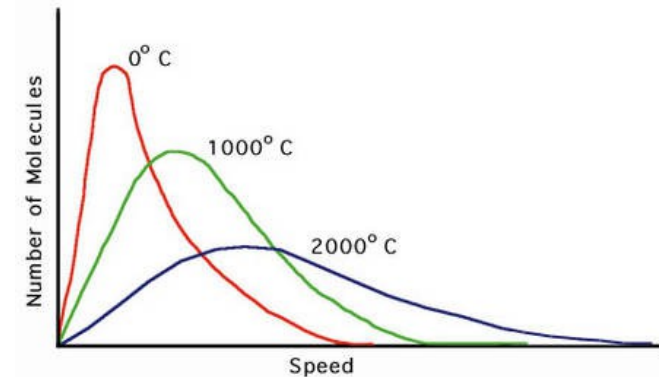


Observations:

1)  $V_{stop}$  :  $I$  stoppé " ] " et non " ) " pourtant :

2) Si double Luminosité (énergie reçue x2) :

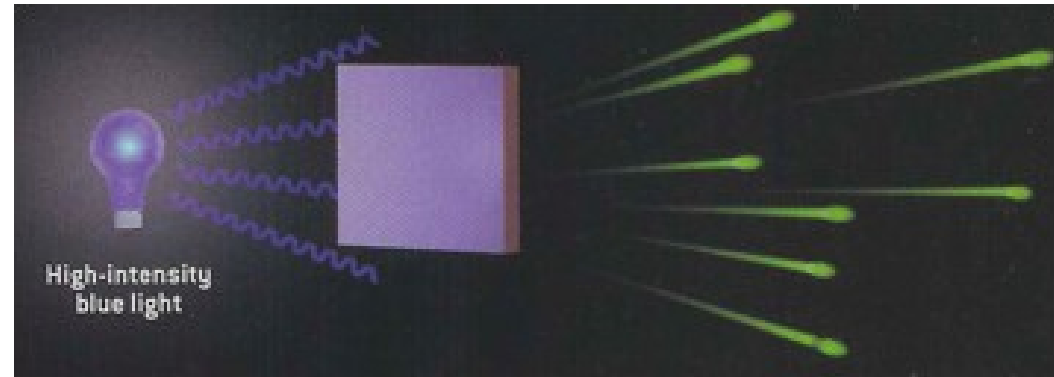
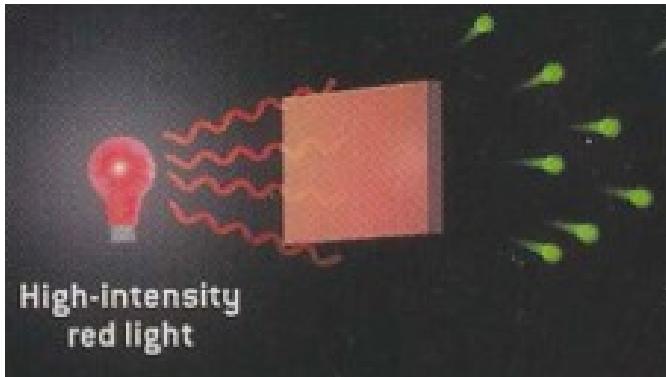
$V_{stop}$  inchangé, en revanche  $I_{col} \times 2$



# Effet de Hertz = Effet photoélectrique

1902: Lenard (assistant de H. Hertz)

3)  $V_{\text{stop}} \nearrow$  quand  $\lambda \searrow$



**Là, rien ne va plus !**

- Onde classique (Maxwell) énergie = Luminosité : mais ici énergie =  $f(1/\lambda)$

Et puis :

- émission instantanée

- longueur d'onde max (énergie min) telle que aucun e- pour  $\lambda > \lambda_{\text{max}}$

(avec  $\lambda_{\text{max}}$  dépendant du matériau pas de l'onde incidente...)

# 1905 : Année d'Einstein (4 publications majeures)

Les quanta d'énergie ont 5 ans..Planck n'y croit tjrs pas mais Einstein, employé du bureau des brevets pousse ce "bouchon" plus loin

Echanges d'énergie entre onde EM et matière sont le fait d'un **corpuscule de lumière (photon)** porteur de l'énergie des quanta de Planck

## Corpuscule : le retour !

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

$\Rightarrow$  **Effet photoélectrique ne s'explique que par chocs entre corpuscules, pas par accumulation de chaleur**

**Nobel pour Einstein en 1921**

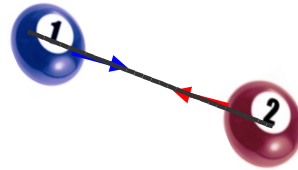
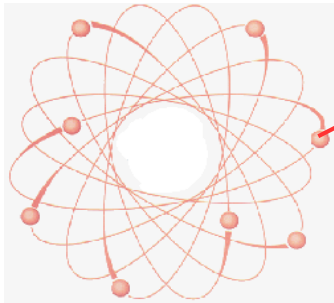
**La révolution quantique est en marche....**

Et ses autres publications (cf ce cours plus loin) sont aussi remarquables



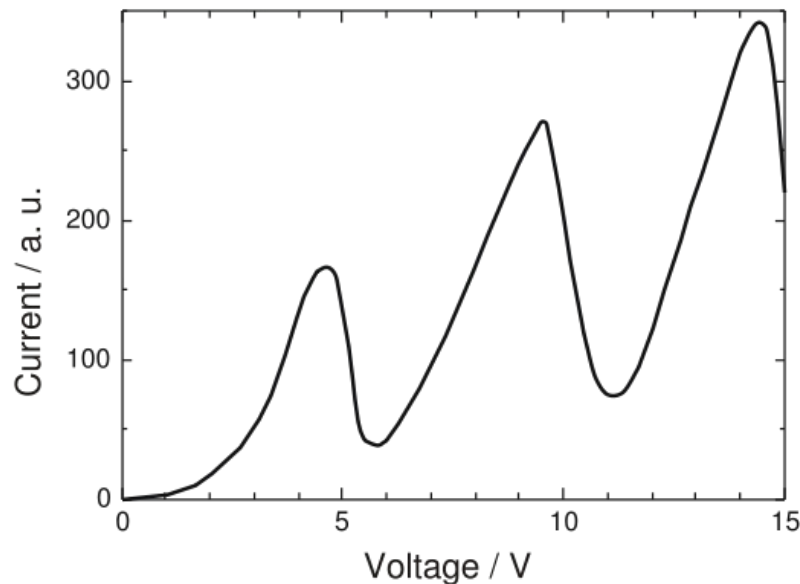
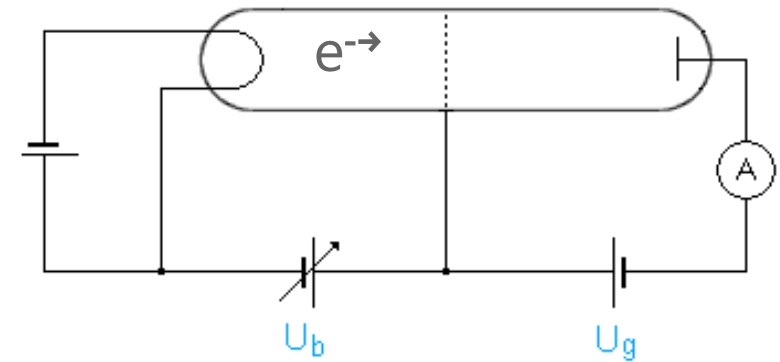
# 1914 : Expérience de Franck et Hertz

But: mesurer précisément le potentiel ionisation du Hg



Dans le tube : les  $e^-$  accélérés dans vapeur de Hg => chocs avec les atomes du gaz , élastiques ou inélastiques ( $e^-$  cèdent de l'énergie aux atomes Hg).

Cathode Grille Anode



Plusieurs fois même structure:

$I_{e^-} \nearrow$  jusqu'à 4,9V élastique puis  
 $I_{e^-} \searrow$  inélastique,  $e^-$  ont cédé 4,9V.

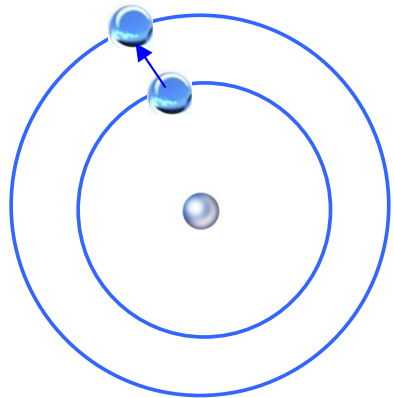
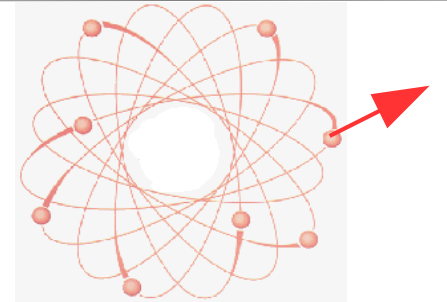
Donc:  $E_{\text{ionisation}} = 4,9\text{V}$   
Ils publient...

**C'est faux  $E_{\text{ionisation Hg}} = 10,4\text{eV}$ !**

# 1914 : Expérience de Franck et Hertz

Bohr avait en 1913 publié le modèle de Bohr!

Ils n'ont pas mesuré l'énergie d'éjection d'un e<sup>-</sup> dans atome version Rutherford ⇒

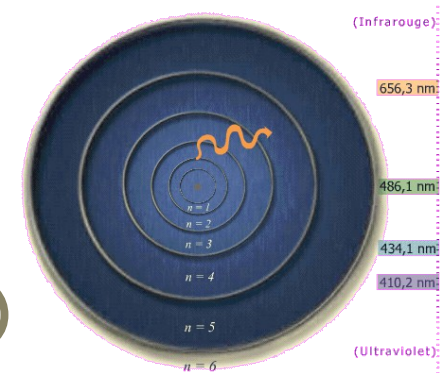


← mais celle pour placer un e<sup>-</sup> une orbite supérieure (excitation)

⇒ ∃ existe des orbites d'énergies différentes:

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

(comme les protons, neutrons du noyau)



Déexcitation d'un électron sur une « orbite » supérieure  
-> émission photons (du X au visible)

# Dualité onde-corpuscule

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

Réciproquement

Les **corpuscules** (e.g. e<sup>-</sup>, p, n...) doivent avoir un aspect **ondulatoire**

Longueur d'onde de De Broglie:

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

- ▶ **petites échelles de distance** (physique 'microscopique')

Application microscopie électronique

- ▶ Si particules  $\approx$  ondes plus de localisation (Fonction d'onde, nuage de probabilités), 'trajectoire' non unique

**Fin du déterminisme !**

# Représentation d'une ionisation

Image en mécanique classique

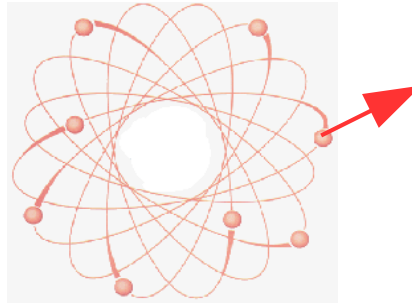
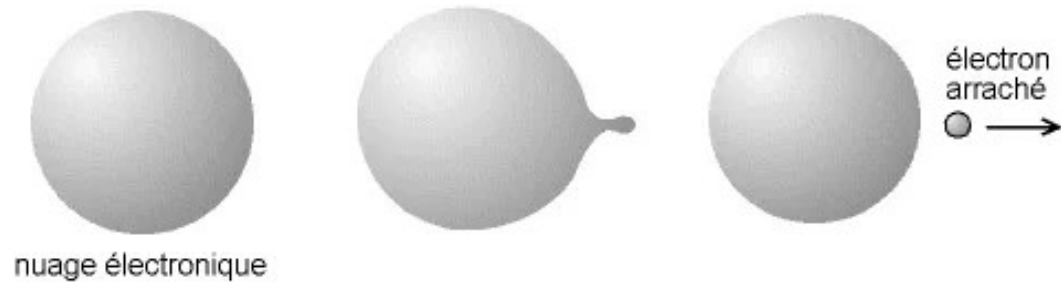


Image en mécanique quantique



# 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 :

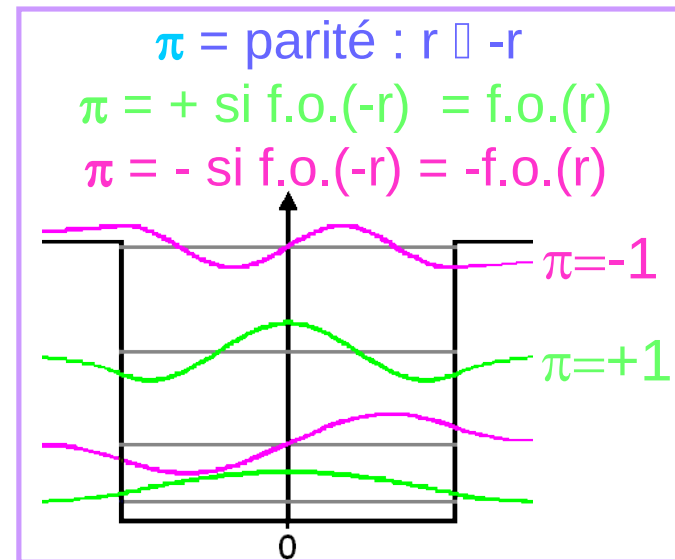
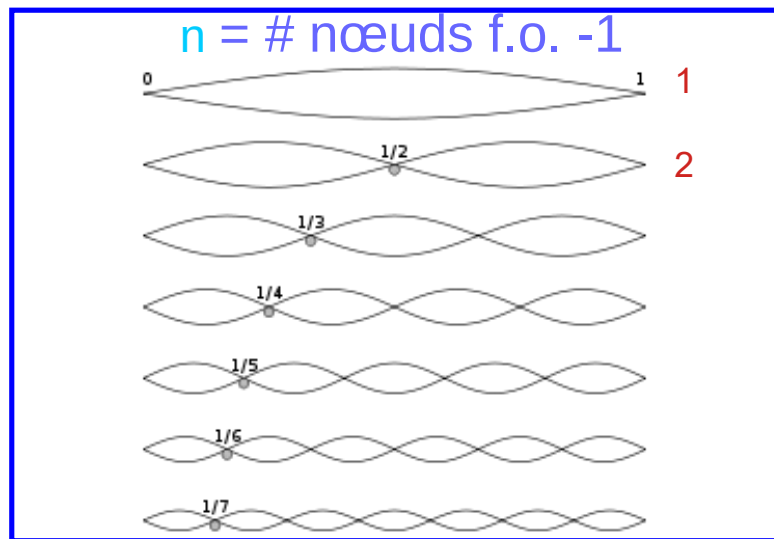
- 1 règles de sélections (états/transitions) basées sur des **nombre quantiques**
- 2 méthodes de calcul : **les diagrammes de Feynman**

# Exemples de nombres quantiques

Avec un équivalent en mécanique classique, (plutôt corpusculaire):



Associé à l'aspect ondulatoire, à la fonction onde (f.o.):



Ces nombres permettent de différencier différents états possibles  
(ex: énergie des niveaux de l'atome)

sources images: fonctions onde et puits potentiel: L. Valentin, "Le monde subatomique"  
schéma modèles en couche : <http://www.e18.physik.tu-muenchen.de/skript/img3572.gif>  
fonction onde paires impaires <http://www.univ-lemans.fr/enseignements/physique/02/divers/qpuits.html>

# 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



$180^\circ$  ok  
 $s = 2$



$360^\circ$  ok  
 $s = 1$

$\neq$



$s = 1/2 \Rightarrow$  rotation de  **$720^\circ$**   
pour que l'objet soit tel qu'à  $0^\circ$   
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.


# 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 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

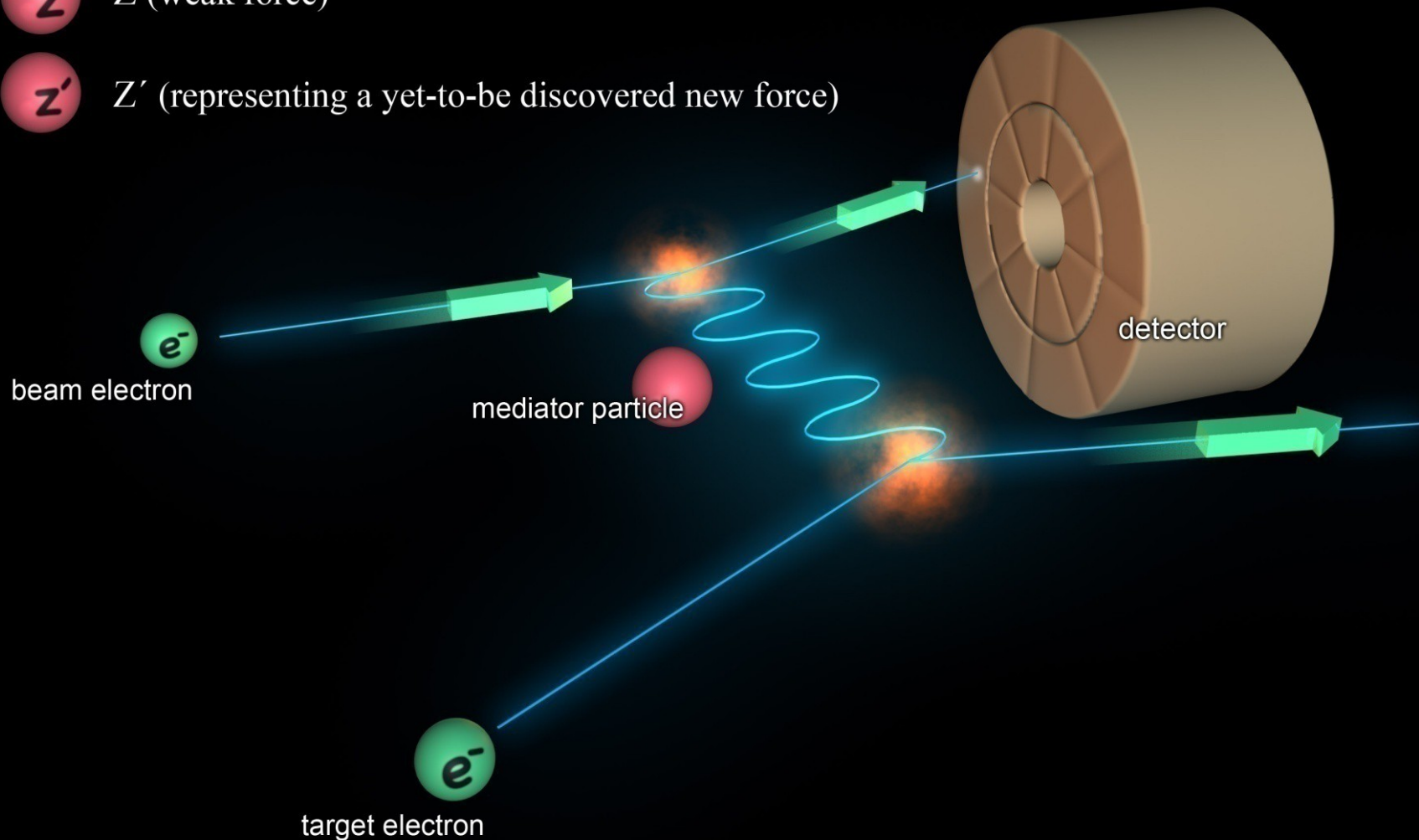
T10



# Un diagramme de Feynman

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

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



## II. Relativité : Xavier Garrido

# Relativité en général

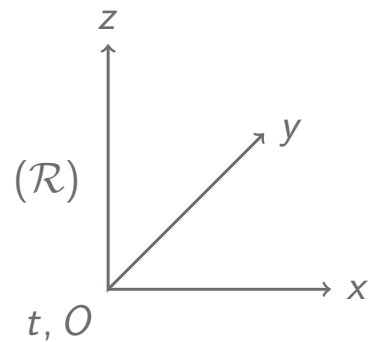
Xavier Garrido

 [xavier.garrido@ijclab.in2p3.fr](mailto:xavier.garrido@ijclab.in2p3.fr)

- ▶ Lois de Newton (1687):  $\sum \vec{F} = m \vec{a}$  **dans tout référentiel galiléen**

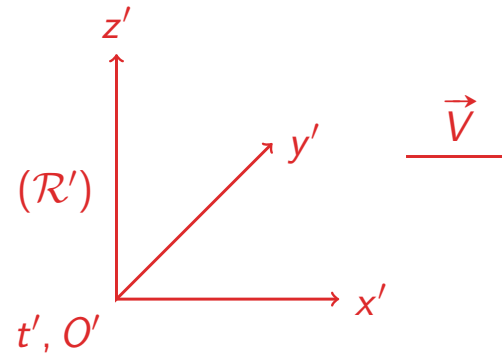
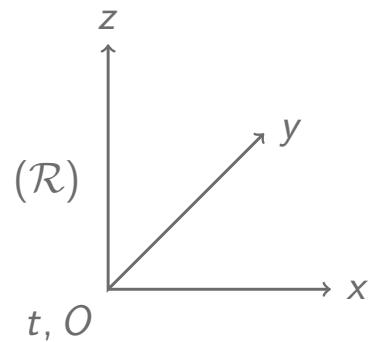
# Relativité galiléenne

- Lois de Newton (1687):  $\sum \vec{F} = m \vec{a}$  dans tout référentiel galiléen



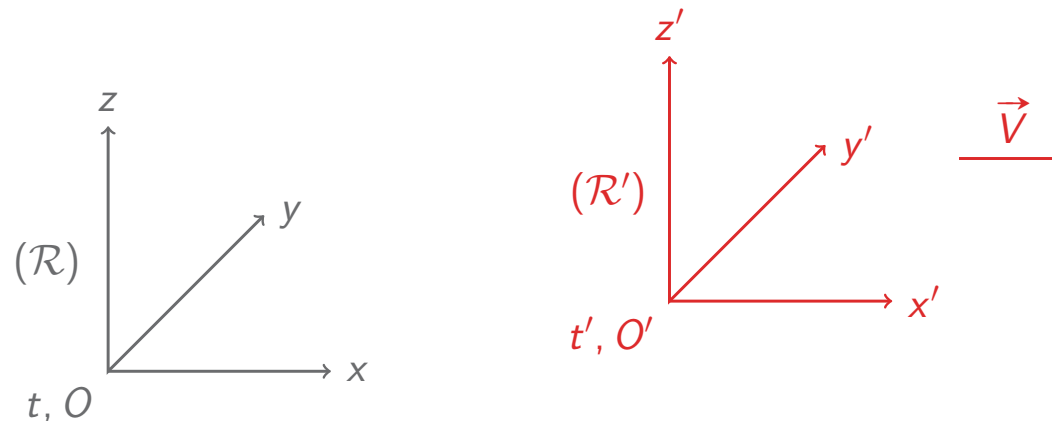
# Relativité galiléenne

- Lois de Newton (1687):  $\sum \vec{F} = m \vec{a}$  dans tout référentiel galiléen



# Relativité galiléenne

- Lois de Newton (1687):  $\sum \vec{F} = m\vec{a}$  dans tout référentiel galiléen



- Transformation galiléenne  $\rightarrow$  loi de composition des vitesses

$$\left\{ \begin{array}{l} t' = t \\ x' = x - Vt \\ y' = y \\ z' = z \end{array} \right. \rightarrow v = v' + V$$

# Relativité galiléenne

- ▶ Galilée (1564 – 1642), premier à considérer que **la vitesse de la lumière est finie**
- ▶ Premières mesures de la vitesse de la lumière : Rømer (satellite de Jupiter – 1676), Bradley (aberration stellaire – 1725)
- ▶ **La lumière et sa vitesse** ne satisfont pas à la loi de composition galiléenne des vitesses
- ▶ Les lois de l'électromagnétisme (Maxwell – 1865) ne sont par ailleurs pas invariantes par transformation galiléenne



# Relativité galiléenne

- ▶ Galilée (1564 – 1642), premier à considérer que **la vitesse de la lumière est finie**
- ▶ Premières mesures de la vitesse de la lumière : Rømer (satellite de Jupiter – 1676), Bradley (aberration stellaire – 1725)
- ▶ **La lumière et sa vitesse** ne satisfont pas à la loi de composition galiléenne des vitesses
- ▶ Les lois de l'électromagnétisme (Maxwell – 1865) ne sont par ailleurs pas invariantes par transformation galiléenne

# Relativité galiléenne

- ▶ Galilée (1564 – 1642), premier à considérer que **la vitesse de la lumière est finie**
- ▶ Premières mesures de la vitesse de la lumière : Rømer (satellite de Jupiter – 1676), Bradley (aberration stellaire – 1725)
- ▶ **La lumière et sa vitesse** ne satisfont pas à la loi de composition galiléenne des vitesses
- ▶ Les lois de l'électromagnétisme (Maxwell – 1865) ne sont par ailleurs pas invariantes par transformation galiléenne

# Relativité galiléenne

- ▶ Galilée (1564 – 1642), premier à considérer que **la vitesse de la lumière est finie**
- ▶ Premières mesures de la vitesse de la lumière : Rømer (satellite de Jupiter – 1676), Bradley (aberration stellaire – 1725)
- ▶ **La lumière et sa vitesse** ne satisfont pas à la loi de composition galiléenne des vitesses
- ▶ Les lois de l'électromagnétisme (Maxwell – 1865) ne sont par ailleurs pas invariantes par transformation galiléenne

# La relativité selon Einstein

- ▶ Einstein (1905) postule que **la vitesse de la lumière est constante** quelque soit le référentiel

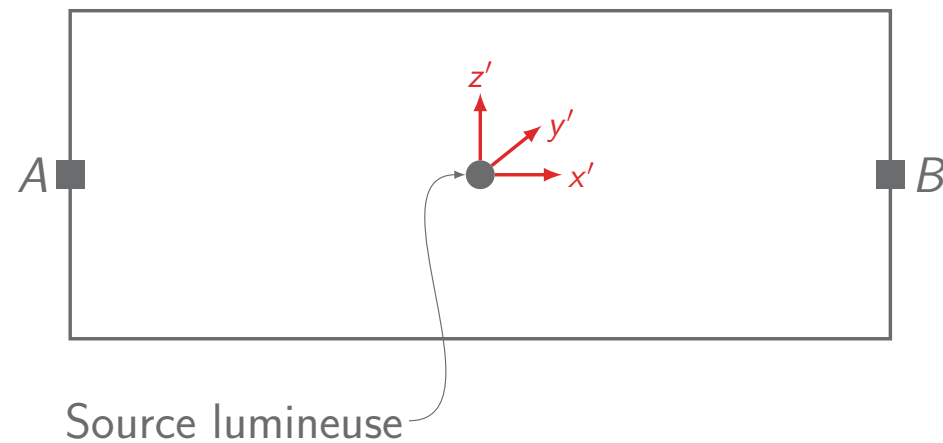
$$c = \text{constante} \simeq 300\,000 \text{ km/s}$$

# La relativité selon Einstein

- ▶ Einstein (1905) postule que **la vitesse de la lumière est constante** quelque soit le référentiel

$$c = \text{constante} \simeq 300\,000 \text{ km/s}$$

- ▶ Simultanéité des événements



# La relativité selon Einstein

- ▶ Einstein (1905) postule que **la vitesse de la lumière est constante** quelque soit le référentiel

$$c = \text{constante} \simeq 300\,000 \text{ km/s}$$

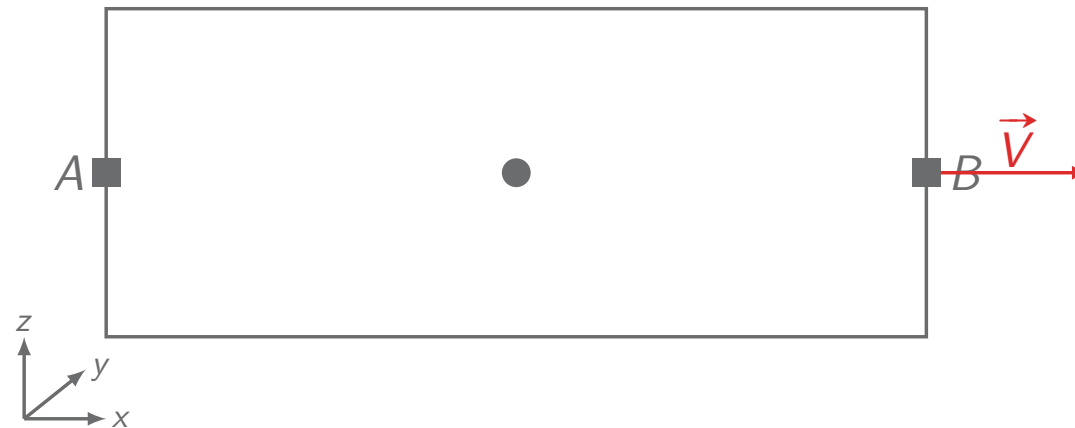
- ▶ Simultanéité des événements

# La relativité selon Einstein

- ▶ Einstein (1905) postule que **la vitesse de la lumière est constante** quelque soit le référentiel

$$c = \text{constante} \simeq 300\,000 \text{ km/s}$$

- ▶ Simultanéité des événements



# La relativité selon Einstein

- ▶ Einstein (1905) postule que **la vitesse de la lumière est constante** quelque soit le référentiel

$$c = \text{constante} \simeq 300\,000 \text{ km/s}$$

- ▶ Simultanéité des événements

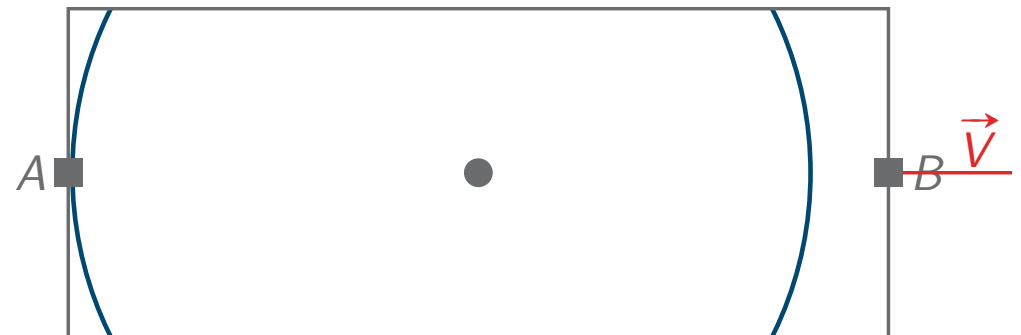


# La relativité selon Einstein

- ▶ Einstein (1905) postule que **la vitesse de la lumière est constante** quelque soit le référentiel

$$c = \text{constante} \simeq 300\,000 \text{ km/s}$$

- ▶ Simultanéité des événements



$$t_A = \frac{l}{2(c+V)} \rightarrow t_A < t_B$$
$$t_B = \frac{l}{2(c-V)}$$

**La notion de simultanéité, de temps est relative à l'observateur**

# La relativité selon Einstein

- ▶ Einstein (1905) postule que **la vitesse de la lumière est constante** quelque soit le référentiel

$$c = \text{constante} \simeq 300\,000 \text{ km/s}$$

- ▶ Relativité restreinte

- ▶ Transformation de Lorentz → nouvelle loi de composition des vitesses

$$\begin{cases} ct' &= \gamma(ct - \beta x) \\ x' &= \gamma(x - \beta ct) \\ y' &= y \\ z' &= z \end{cases} \quad \text{où } \begin{cases} \beta &= \frac{V}{c} \\ \gamma &= \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} = \text{Facteur de Lorentz} \end{cases}$$

$$\text{et } v = \frac{v' + V}{1 + v' \frac{V}{c^2}}$$

- ▶ Facteur de Lorentz :

- ▶ Au repos,  $V = 0$ ,  $\beta = 0$  et  $\gamma = 1$
- ▶  $V \rightarrow c$ ,  $\beta \rightarrow 1$  et  $\gamma \rightarrow \infty$
- ▶ Vitesse du train  $V = 200 \text{ km/h}$  :  $\beta \sim 2 \cdot 10^{-7}$  et  $\gamma \sim 1.00000000000000173$

# La relativité selon Einstein

- ▶ Einstein (1905) postule que **la vitesse de la lumière est constante** quelque soit le référentiel

$$c = \text{constante} \simeq 300\,000 \text{ km/s}$$

- ▶ Relativité restreinte

- ▶ Transformation de Lorentz → nouvelle loi de composition des vitesses

$$\begin{cases} ct' &= \gamma(ct - \beta x) \\ x' &= \gamma(x - \beta ct) \\ y' &= y \\ z' &= z \end{cases} \quad \text{où } \begin{cases} \beta &= \frac{V}{c} \\ \gamma &= \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} = \text{Facteur de Lorentz} \end{cases}$$

$$\text{et } v = \frac{v' + V}{1 + v' \frac{V}{c^2}}$$

- ▶ Facteur de Lorentz :

- ▶ Au repos,  $V = 0$ ,  $\beta = 0$  et  $\gamma = 1$
- ▶  $V \rightarrow c$ ,  $\beta \rightarrow 1$  et  $\gamma \rightarrow \infty$
- ▶ Vitesse du train  $V = 200 \text{ km/h}$  :  $\beta \sim 2 \cdot 10^{-7}$  et  $\gamma \sim 1.00000000000000173$

# La relativité selon Einstein

- ▶ Einstein (1905) postule que **la vitesse de la lumière est constante** quelque soit le référentiel

$$c = \text{constante} \simeq 300\,000 \text{ km/s}$$

- ▶ Relativité restreinte

- ▶ Transformation de Lorentz → nouvelle loi de composition des vitesses

$$\begin{cases} ct' &= \gamma(ct - \beta x) \\ x' &= \gamma(x - \beta ct) \\ y' &= y \\ z' &= z \end{cases} \quad \text{où } \begin{cases} \beta &= \frac{V}{c} \\ \gamma &= \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} = \text{Facteur de Lorentz} \end{cases}$$

$$\text{et } v = \frac{v' + V}{1 + v' \frac{V}{c^2}}$$

- ▶ Facteur de Lorentz :

- ▶ Au repos,  $V = 0$ ,  $\beta = 0$  et  $\gamma = 1$
- ▶  $V \rightarrow c$ ,  $\beta \rightarrow 1$  et  $\gamma \rightarrow \infty$
- ▶ Vitesse du train  $V = 200 \text{ km/h}$  :  $\beta \sim 2 \cdot 10^{-7}$  et  $\gamma \sim 1.000000000000000173$

► Contraction des longueurs

$$l = \frac{l_0}{\gamma} \text{ où } l_0 \text{ est la longueur dans le référentiel au repos}$$

Pour un train à  $V = 200 \text{ km/h}$ ,  $l_0 - l \sim 7 \cdot 10^{-12} \text{ m}$

► Dilatation des intervalles de temps

$$\tau = \gamma \cdot \tau_0 \text{ où } \tau_0 \text{ est l'intervalle de temps dans le référentiel au repos}$$

Découverte du muon – Anderson 1936 :  $\tau_0 = 2.2 \mu\text{s}$

► Contraction des longueurs

$$l = \frac{l_0}{\gamma} \text{ où } l_0 \text{ est la longueur dans le référentiel au repos}$$

Pour un train à  $V = 200 \text{ km/h}$ ,  $l_0 - l \sim 7 \cdot 10^{-12} \text{ m}$

► **Dilatation des intervalles de temps**

$$\tau = \gamma \cdot \tau_0 \text{ où } \tau_0 \text{ est l'intervalle de temps dans le référentiel au repos}$$

Découverte du muon – Anderson 1936 :  $\tau_0 = 2.2 \mu\text{s}$

- ▶ Conservation de l'impulsion : **augmentation de la masse inertielle**

$$m = \gamma \cdot m_0 \text{ où } m_0 \text{ est la masse au repos ou masse invariante}$$

- ▶ Accélérer jusqu'à  $c \rightarrow$  masse infinie et donc énergie infinie
- ▶ Énergie cinétique classique  $T = \frac{1}{2}m_0v^2$  devient en relativité restreinte

$$T = (m - m_0)c^2 = (\gamma - 1)m_0c^2$$

- ▶ Énergie totale  $E = mc^2 = \gamma m_0 c^2 = T + \underbrace{m_0 c^2}_{\text{énergie au repos}}$  (Einstein – 1907)

- ▶ Conservation de l'impulsion : **augmentation de la masse inertielle**

$$m = \gamma \cdot m_0 \text{ où } m_0 \text{ est la masse au repos ou masse invariante}$$

- ▶ Accélérer jusqu'à  $c \rightarrow$  masse infinie et donc énergie infinie
- ▶ Énergie cinétique classique  $T = \frac{1}{2}m_0v^2$  devient en relativité restreinte

$$T = (m - m_0)c^2 = (\gamma - 1)m_0c^2$$

- ▶ Énergie totale  $E = mc^2 = \gamma m_0 c^2 = T + \underbrace{m_0 c^2}_{\text{énergie au repos}}$  (Einstein – 1907)



- ▶ Conservation de l'impulsion : **augmentation de la masse inertielle**

$$m = \gamma \cdot m_0 \text{ où } m_0 \text{ est la masse au repos ou masse invariante}$$

- ▶ Accélérer jusqu'à  $c \rightarrow$  masse infinie et donc énergie infinie
- ▶ Énergie cinétique classique  $T = \frac{1}{2}m_0v^2$  devient en relativité restreinte

$$T = (m - m_0)c^2 = (\gamma - 1)m_0c^2$$

- ▶ Énergie totale  $E = mc^2 = \gamma m_0c^2 = T + \underbrace{m_0c^2}_{\text{énergie au repos}}$  (Einstein – 1907)

- ▶ Conservation de l'impulsion : **augmentation de la masse inertielle**

$$m = \gamma \cdot m_0 \text{ où } m_0 \text{ est la masse au repos ou masse invariante}$$

- ▶ Accélérer jusqu'à  $c \rightarrow$  masse infinie et donc énergie infinie
- ▶ Énergie cinétique classique  $T = \frac{1}{2}m_0v^2$  devient en relativité restreinte

$$T = (m - m_0)c^2 = (\gamma - 1)m_0c^2$$

- ▶ Énergie totale  $E = mc^2 = \gamma m_0 c^2 = T + \underbrace{m_0 c^2}_{\text{énergie au repos}}$  (Einstein – 1907)

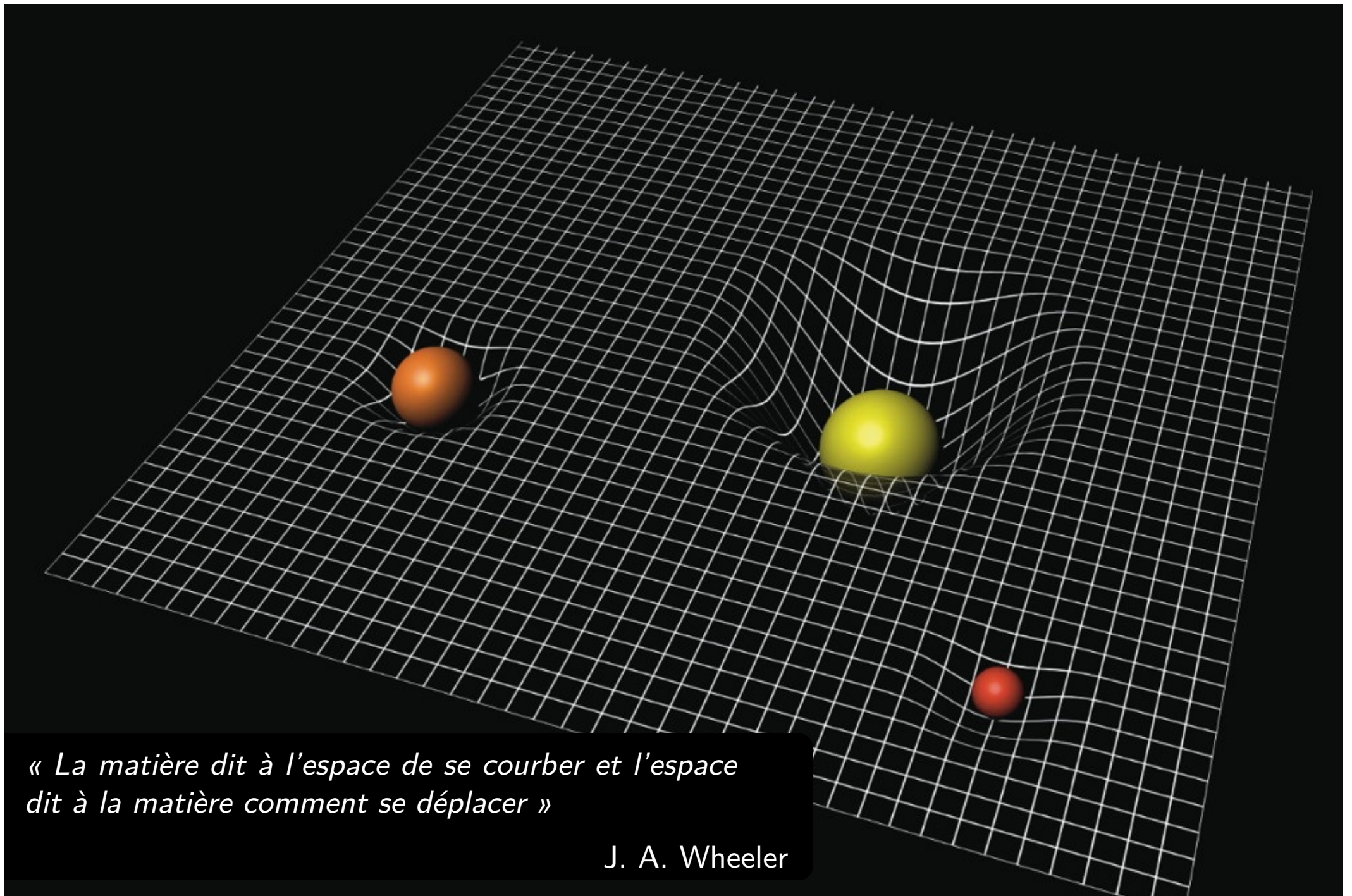
# Relativité générale

- ▶ Einstein (1915) : intégration de la gravitation au sein de la relativité restreinte

# Relativité générale

- ▶ Einstein (1915) : intégration de la gravitation au sein de la relativité restreinte

**Relativité Générale = Théorie de la gravitation**  
= Relativité Restreinte + **Principe d'équivalence**



*« La matière dit à l'espace de se courber et l'espace dit à la matière comment se déplacer »*

J. A. Wheeler

- ▶ Première vérification : **avance du périhélie de Mercure**
  - « *Voici venue la fin de mes tourments. Ce qui m'a fait le plus plaisir, c'est de constater que ma théorie concorde avec le déplacement du périhélie de Mercure* »
- ▶ Première prédiction vérifiée : **déviations de la lumière**
  - ▶ Observation de la déviation des rayons lumineux d'une étoile pendant une éclipse totale du soleil – Arthur Eddington 1919
  - ▶ Effet de lentille gravitationnelle
- ▶ Découverte des ondes gravitationnelles : LIGO/VIRGO 2016

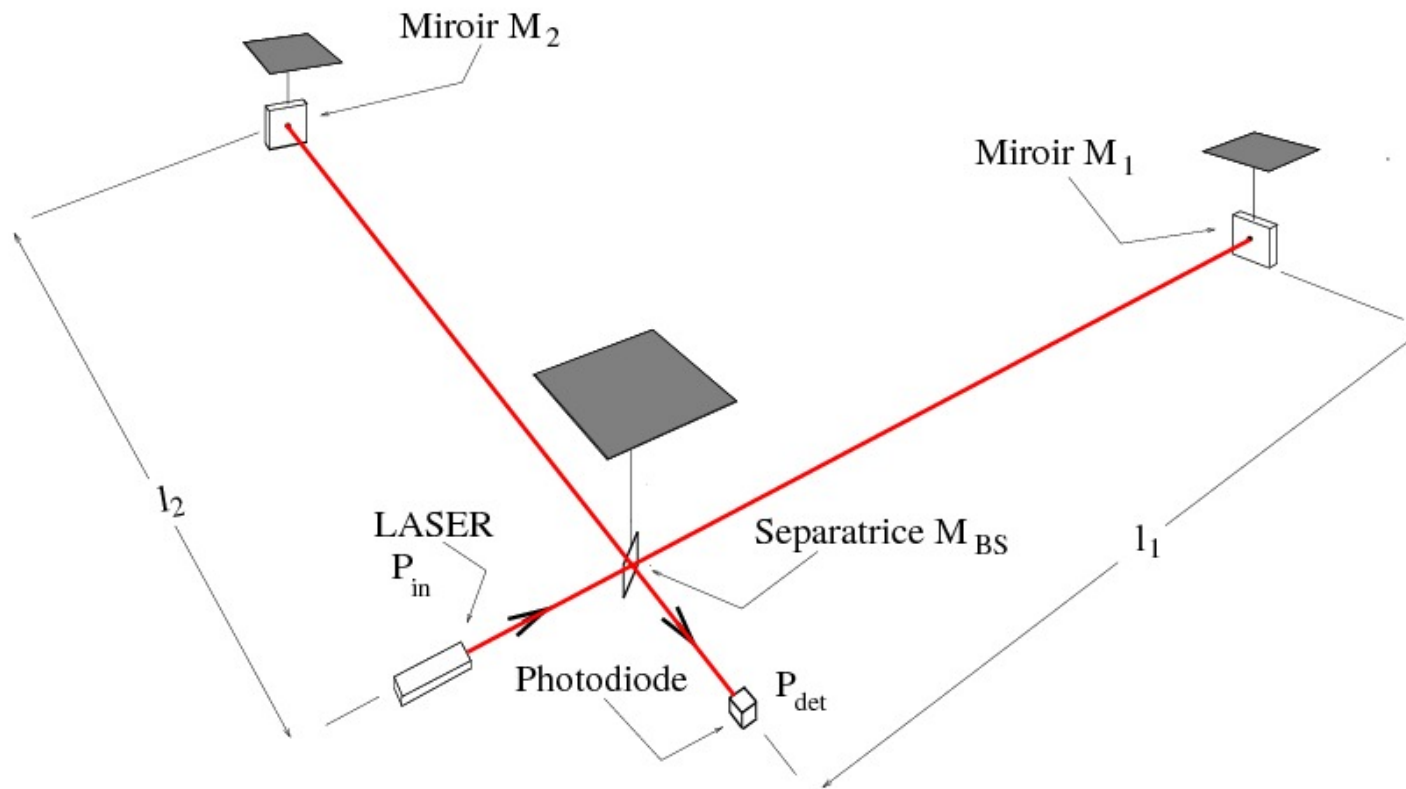
- ▶ Première vérification : **avance du périhélie de Mercure**  
*« Voici venue la fin de mes tourments. Ce qui m'a fait le plus plaisir, c'est de constater que ma théorie concorde avec le déplacement du périhélie de Mercure »*
- ▶ Première prédiction vérifiée : **déviations de la lumière**
  - ▶ Observation de la déviation des rayons lumineux d'une étoile pendant une éclipse totale du soleil – Arthur Eddington 1919
  - ▶ Effet de lentille gravitationnelle
- ▶ Découverte des ondes gravitationnelles : LIGO/VIRGO 2016

- ▶ Première vérification : **avance du périhélie de Mercure**  
*« Voici venue la fin de mes tourments. Ce qui m'a fait le plus plaisir, c'est de constater que ma théorie concorde avec le déplacement du périhélie de Mercure »*
- ▶ Première prédiction vérifiée : **déviations de la lumière**
  - ▶ Observation de la déviation des rayons lumineux d'une étoile pendant une éclipse totale du soleil – Arthur Eddington 1919
  - ▶ Effet de lentille gravitationnelle
- ▶ Découverte des ondes gravitationnelles : LIGO/VIRGO 2016



# Découverte des ondes gravitationnelles

Phys. Rev. Lett. 116, 2016 [↗](#)



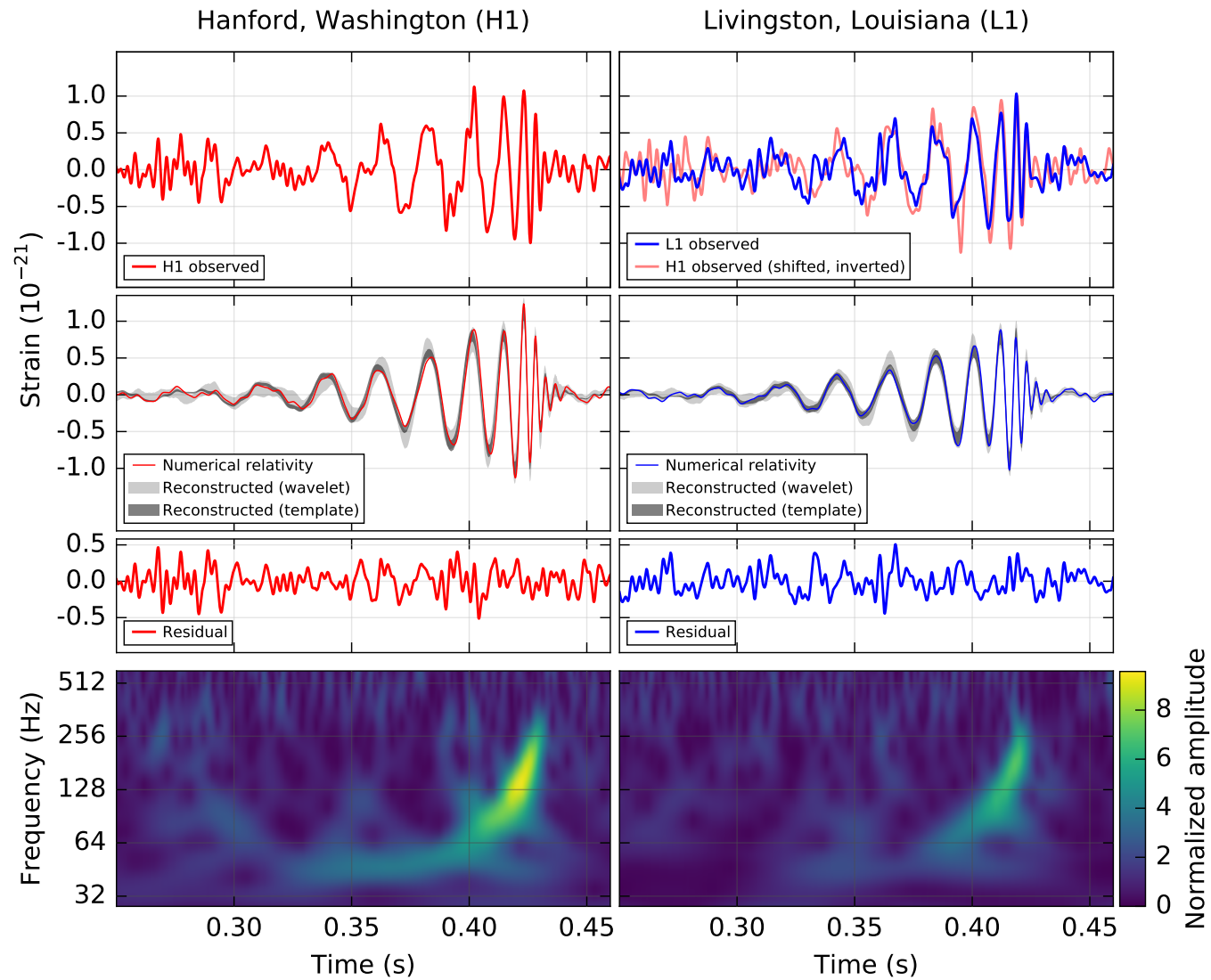
# Découverte des ondes gravitationnelles

Phys. Rev. Lett. 116, 2016 [↗](#)



# Découverte des ondes gravitationnelles

Phys. Rev. Lett. 116, 2016 [↗](#)



- ▶ 1<sup>er</sup> nuage → **Mécanique Quantique**
  - ▶ Nature corpusculaire des ondes e.m.  $E = h\nu$
  - ▶ Nature ondulatoire des corpuscules  $\lambda = h/p$
  - ▶ Interactions quantifiées – **particules médiatrices**
  - ▶ Nombres quantiques
  - ▶ Théorie **probabiliste** (non déterministe)
- ▶ 2<sup>nd</sup> nuage → **théories de la relativité**
  - ▶ Plus de temps ni d'espace absolus – "tout est relatif"
  - ▶ Équivalence masse – énergie  $E = mc^2$
  - ▶ Notions de temps et masse propres
  - ▶ important surtout à haute vitesse/énergie (physique subatomique, astrophysique)
- ▶ Dans les deux cas il s'agit de généralisations de la physique "classique" (qui demeure "valable" à basse énergie et grande échelle)

- ▶ 1<sup>er</sup> nuage → **Mécanique Quantique**
  - ▶ Nature corpusculaire des ondes e.m.  $E = h\nu$
  - ▶ Nature ondulatoire des corpuscules  $\lambda = h/p$
  - ▶ Interactions quantifiées – **particules médiatrices**
  - ▶ Nombres quantiques
  - ▶ Théorie **probabiliste** (non déterministe)
- ▶ 2<sup>nd</sup> nuage → **théories de la relativité**
  - ▶ Plus de temps ni d'espace absolus – "tout est relatif"
  - ▶ Équivalence masse – énergie  $E = mc^2$
  - ▶ Notions de temps et masse propres
  - ▶ important surtout à **haute vitesse/énergie** (physique subatomique, astrophysique)
- ▶ Dans les deux cas il s'agit de généralisations de la physique "classique" (qui demeure "valable" à basse énergie et grande échelle)

# Conclusions

- ▶ 1<sup>er</sup> nuage → **Mécanique Quantique**
  - ▶ Nature corpusculaire des ondes e.m.  $E = h\nu$
  - ▶ Nature ondulatoire des corpuscules  $\lambda = h/p$
  - ▶ Interactions quantifiées – **particules médiatrices**
  - ▶ Nombres quantiques
  - ▶ Théorie **probabiliste** (non déterministe)
- ▶ 2<sup>nd</sup> nuage → **théories de la relativité**
  - ▶ Plus de temps ni d'espace absolus – "tout est relatif"
  - ▶ Équivalence masse – énergie  $E = mc^2$
  - ▶ Notions de temps et masse propres
  - ▶ important surtout à **haute vitesse/énergie** (physique subatomique, astrophysique)
- ▶ Dans les deux cas il s'agit de généralisations de la physique "classique" (qui demeure "valable" à basse énergie et grande échelle)

# Références

- ▶ Cours en ligne de Richard Taillet – Université de Savoie [↗](#)
- ▶ Notes de cours de Nicolas Pavloff – Université Paris-Saclay [↗](#)
- ▶ Notes de cours de Patrick Puzo