

# Le calme avant la tempête

- en 1871 James Clerk Maxwell annonçait que "dans quelques années les hommes de sciences passeraient leur temps à ajouter quelques décimales aux grandes constantes de la physique".
- 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"...



et qui va bien s'obscurcir...

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

# La Mécanique des Ondes ?

Deux disciplines classiques, qui semblaient compatibles\*, se partageaient la description du monde:

 la mécanique rationnelle (méca statistique, thermodynamique)

→ échanges d'énergie

 l'électromagnétisme (théorie des ondes de Maxwell)

→ rayonnement lumineux

Mais deux incompatibilités (les deux nuages de Lord Kelvin), vont surgir de deux expériences:

 Michelson et Morley : Mesures de vitesse de la lumière (est-elle liée à un référentiel?) ⇒ **Relativité - A. Einstein (1905)**

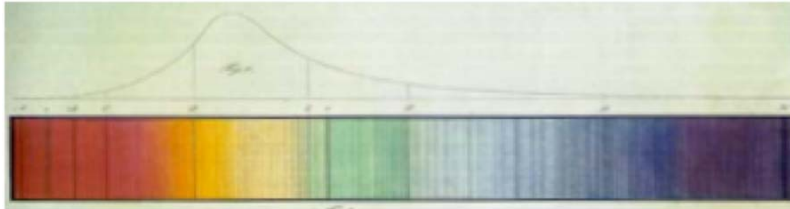
 Spectre de la lumière émise par un corps à l'équilibre thermique

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

⇒ **Ce cours**

\*aujourd'hui on dirait unifiées

# Sur la lumière des corps



1814: Von Fraunhofer

spectre solaire continu, mais bandes noires

1854: Kirchhoff (lois de)

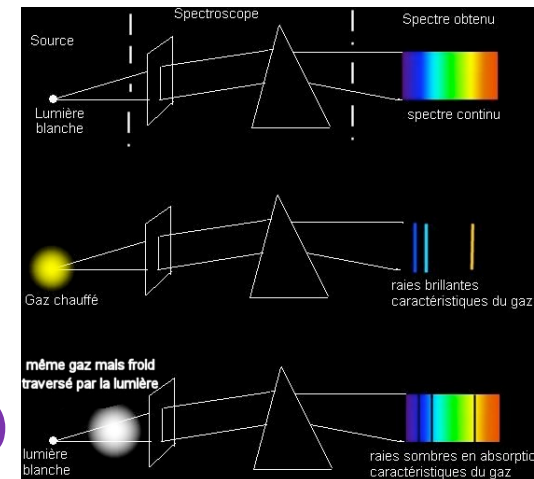
◆ raies (absorption et émission)

→ Identification élts (1869 Angström)

◆ **spectre continu : rayonnement thermique (ex: soleil)**

Tout Corps (dense) chaud  $\Rightarrow$  spectre E.M  $\propto$  selon  $f(T, \lambda)$

indépendante du corps mais  $f(T, \lambda)$  inconnue....



◆ 1862: Invention de l'émetteur thermique idéal le **CORPS NOIR**:

Extérieur absorbe toute énergie transmise par ondes E.M. (noir) ;  
Intérieur clos  $\Rightarrow$  sempiternels échanges matière - rayonnement thermique  
 $\Rightarrow$  équilibre thermique à T de l'enceinte où le corps est plongé.

# Rayonnement du corps noir: quelle $f(T, \lambda)$ ?

1854-...Des décennies d'études du corps noir



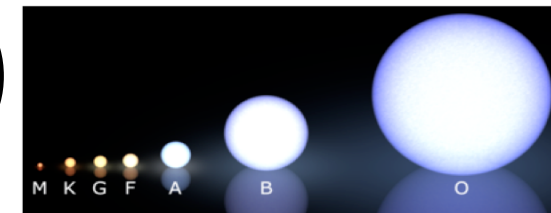
≡ four avec trou



1879: Stefan

Loi empirique puiss. rayée  $\mathcal{M} = \sigma T^4$  ( $\propto \int f(T, \lambda) d\lambda$ )

luminosité étoile  $\mathcal{L} = 4\pi R^2 \mathcal{M} \Rightarrow$  donne T et R



classification Yerkes 1943

1884: Boltzman

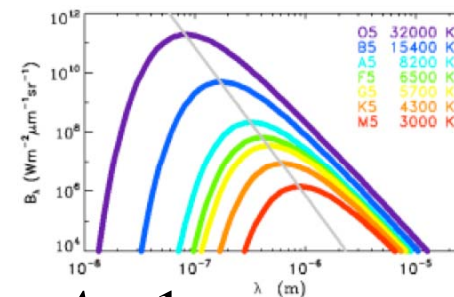
démontre Loi de Stefan(-Boltzman) via Thermo. + électromag: tout va bien...

1896: Wien

2 lois empiriques dites

- du déplacement spectral:  $\lambda_{\max} \propto 1/T$

- du rayonnement : 1<sup>ère</sup> exp.  $f_W(T, \lambda) = \frac{A}{\lambda^3} \frac{1}{e^{\frac{B}{\lambda T}}}$



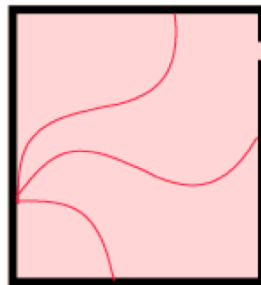
Aie, ça commence:  
Ne colle pas pour  $\lambda \gg 1$ !

# 1900: Année 0 du corps noir quantique

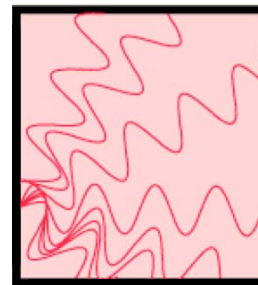
## Rayleigh

Modèle liant EM **et** mécanique statistique:  
propagat° : onde e.m.  $\equiv$  onde méca. (corde)

Calcul # modes vibratoires par unité volume

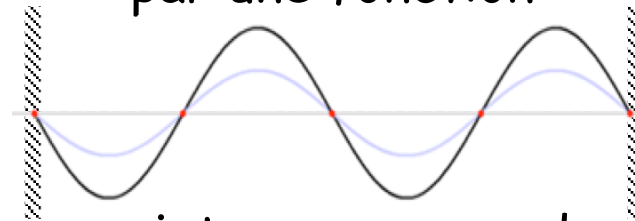


# modes  $\nearrow$  qd  $\lambda \searrow$   
 $E = kT/2$  par mode



$$\Rightarrow f_R(T, \lambda) = C \frac{kT}{\lambda^2}$$

Représentation d'une onde  
par une fonction



point rouge = nœud

Distance entre 2 crêtes =  $\lambda$

Aie, Aie, cette fois-ci:

pb à  $\lambda \ll 1$  ( $f \rightarrow \infty$ ): "Catastrophe Ultraviolette"\*

\* Ehrenfest 1911

# 1900: Année 0 du corps noir quantique

Planck (élève de Kirchoff)

-19 Oct.: accord excellent  $\forall \lambda$  si Wien modifiée :

$$f_P(T, \lambda) = \frac{A}{\lambda^3} \frac{1}{e^{\frac{B}{\lambda T}} - 1}$$

-14 Déc.  $\Leftrightarrow$  interp. stat. de Rayleigh si + 1 hyp :

énergie d'1 n<sup>ième</sup> mode  $E_n = n\varepsilon$ , alors méca. stat.  $\Rightarrow$

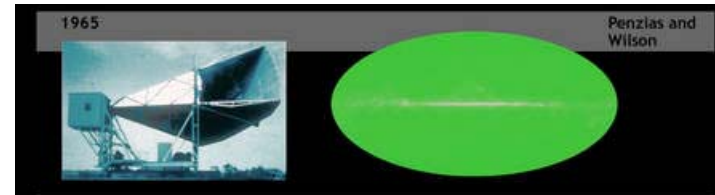
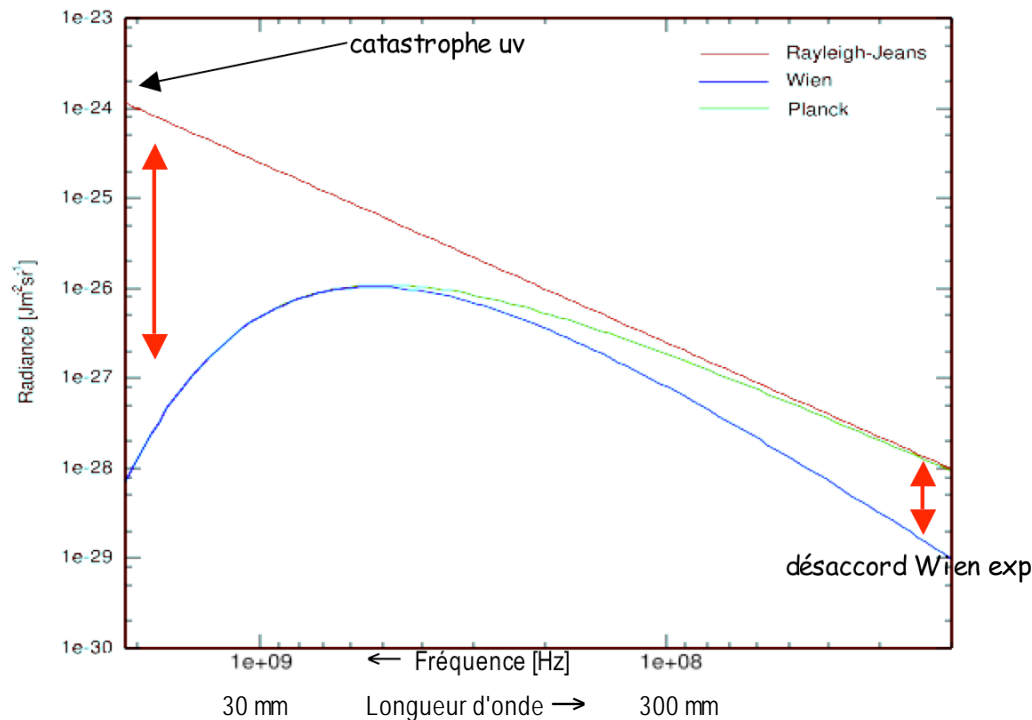
$$\overline{E} = \frac{\varepsilon}{e^{\frac{\varepsilon}{kT}} - 1}$$

par identification  $\varepsilon = h\nu$ ,  $h$  pour "hilkonstante"

un tout petit coup de pouce...:  $h = 6.62 \cdot 10^{-34}$  Js (1<sup>ère</sup> mesure Millikan 1916)

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

# Difficile de faire mieux mais...

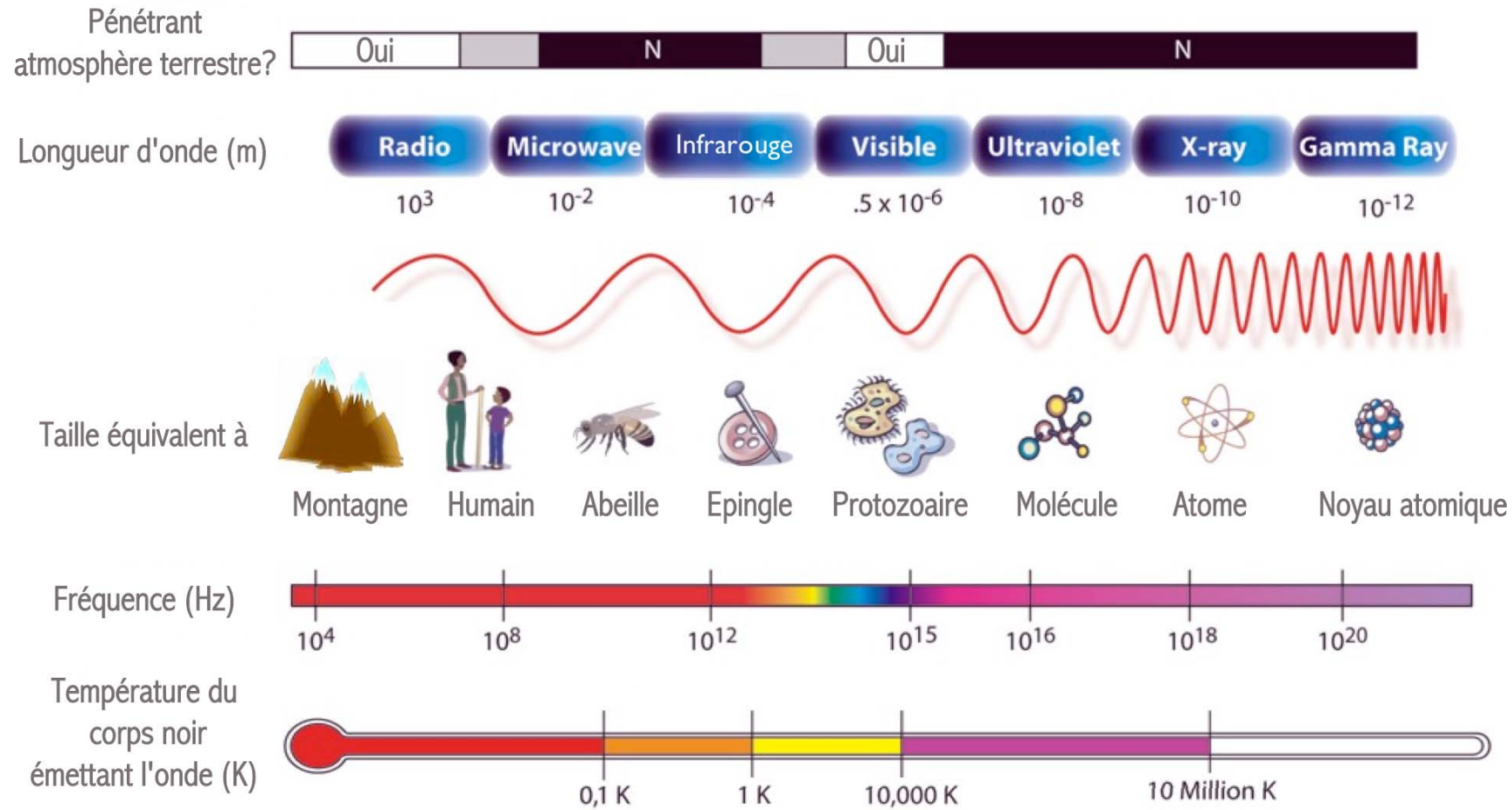


Au début de l'univers, comme dans un corps noir, matière et rayonnement étaient en équilibre (entre  $T \sim 10^4$  et  $3 \cdot 10^3$  °K). Mais l'expansion a brisé l'équilibre, le "dernier" rayonnement thermique s'est fossilisé et refroidit tjrs :  $T \sim 3$ °K (micro-ondes, mm)

...mais difficile à avaler même par son auteur:

"...Mes vaines tentatives pour ajuster le quantum élémentaire d'action d'une manière ou d'une autre au cadre de la physique classique se poursuivirent pendant un certain nombre d'années et elles me coûtèrent beaucoup d'efforts. De nombreux collègues trouvèrent qu'il y avait là quelque chose qui frisait la tragédie... Mais je suis à cet égard d'une opinion différente... Car la **lumière totale** que j'éprouvais alors me fut vraiment un enrichissement sans égal. "  
(Extrait du discours de la remise du Nobel de Physique de Planck en 1918)

# Spectre électromagnétique et corps noir



Les ondes EM restaient à peu près sauvées, on pouvait penser que le corps noir montrait juste qu'elles ne sont pas comme des ondes mécaniques....

*jusque là ça pouvait encore passer...*

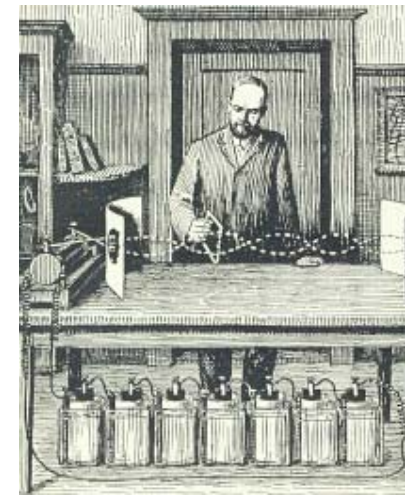
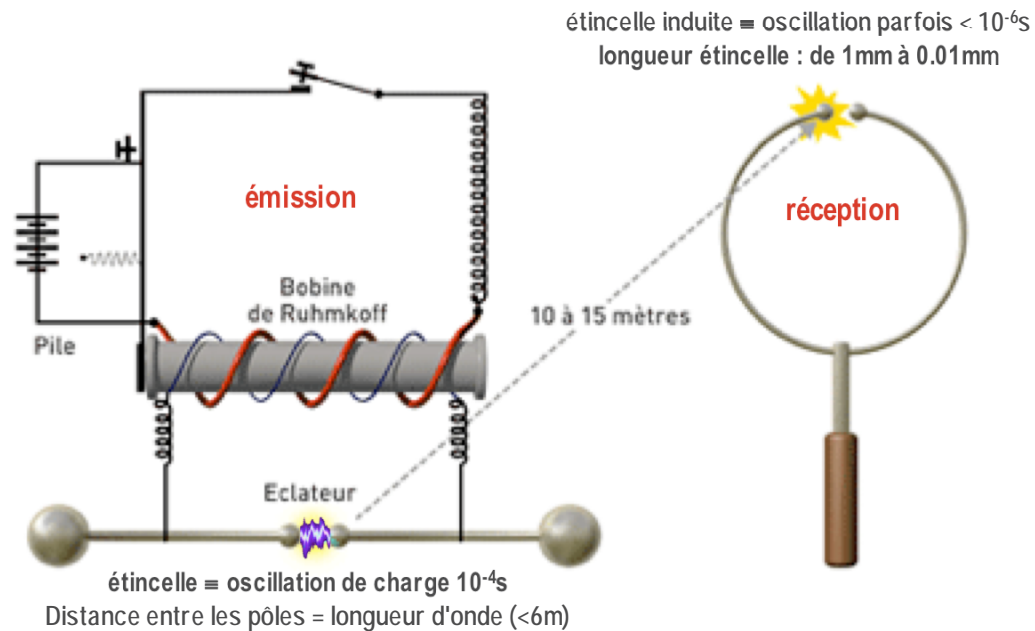


# Pendant ce temps H. Hertz\* (1886)

Maxwell: onde E.M. engendrée par vibration charges

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

⇒ Construire un diapason électrique (🎵 = onde mécanique 440Hz)



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

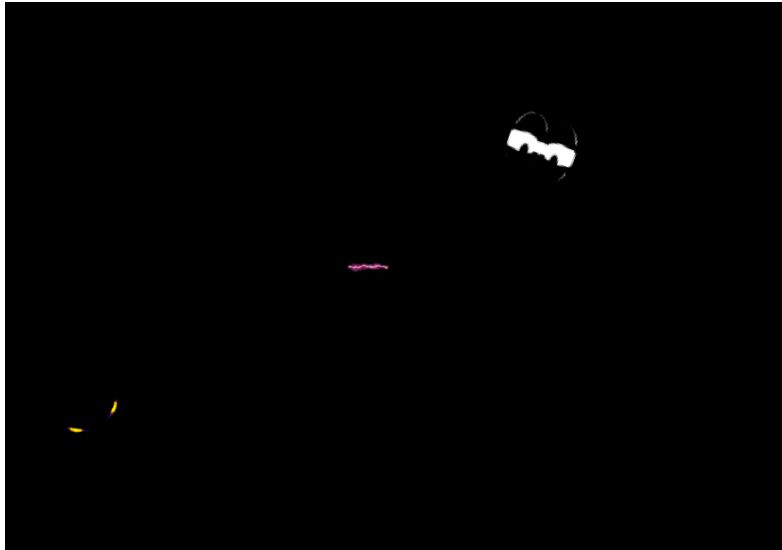
- Lumière  $\Leftrightarrow$  onde E.M.
- Mesure de  $c$



*Désintéressé par l'aspect financier de sa découverte,  
il cède ses droits à G. Marconi qui dépose le brevet  
de la Transmission Sans Fil en 1896...*

\*Oncle du suivant, le Nobel F. Hertz

# Effet de Hertz



1887: Hertz pour mieux voir 2<sup>nd</sup>e étincelle

⇒ récepteur dans boîte noire

...et il la voit moins bien : +rare, + petite...!!!

écran entre émetteur et récepteur

verre, mica, gaz houille ⇒ tjrs diminution

quartz ⇒ retour de l'étincelle

⇒ est favorisée par les UV

Publie sans explications et retourne à Maxwell

1888: W. Hallwachs

Étincelle = décharge électrique simple avec charge statique

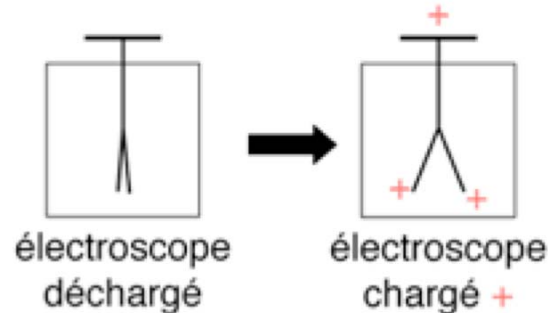
⇒ apparition de charges positives

1879-1895: Crookes et J. Perrin

rayons cathodiques Crookes= corpuscules  $q < 0$  libérés par HV ('électrons' 1894)

1897: Thomson

Effet de Hertz  $\Leftrightarrow$  même électrons libérés par UV  $\Rightarrow$  vibration de charges tjrs...



# Effet de Hertz = Effet photoélectrique

1902: Lennard

Utilise une lampe à arc Luminosité  $1 \nearrow 1000$

Le courant  $I$  mesure le # d' $e^-$  qui ont réussi malgré  $V$  les liant/repoussant des plaques

$\Rightarrow V$  variable: mesure énergie max des  $e^-$

Observations:

Existence d'un seuil  $V_{stop}$  stoppant net  $I$ : "  $\perp$  " et non "  $\curvearrowright$  "

Si double Luminosité :  $V_{stop}$  inchangé, mais  $I \times 2$

Si change la longueur onde: change énergie max des  $e^-$ ,  $V_{stop} \nearrow$  quand  $\lambda \searrow$

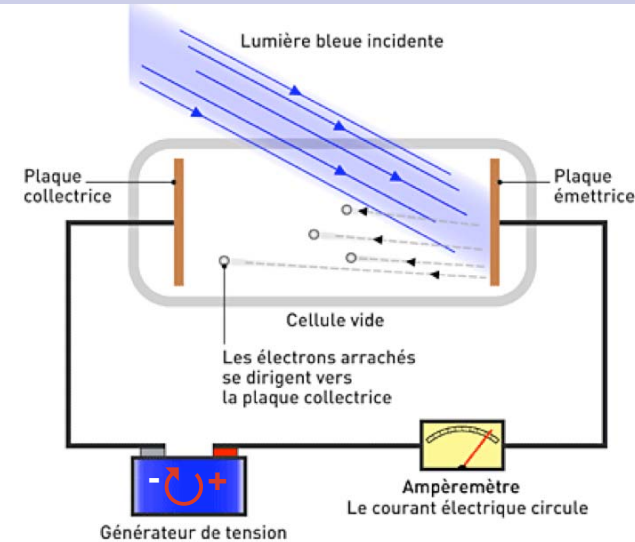
## GROS, GROS PROBLEME

❗ Onde classique  $E=f(\text{Luminosité})$ ,  $e^-$  éjectés par vibration

mais Lennard observe  $E=f(1/\lambda)$ , et avec un seuil (pas d'  $e^-$  pour  $\lambda > \lambda_{max}$ ) !!!

❗ Enfin réaction instantanée, pas de temps correspondant à accumulation...

❗ Et puis  $\lambda_{max}$  dépend du matériau de l'émettrice pas de l'onde incidente...



# 1905: Année d'Einstein

1905: les quanta d'énergie ont 5 ans..Planck n'y croit tjrs pas mais Einstein, du bureau des brevets\* pousse son "bouchon" plus loin

Hyp: aspect corpusculaire du rayonnement e.m.

Echange énergie matière  $\leftrightarrow$  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  $E_\nu = h\nu$

Int:

à  $V=0$ , si  $e^-$  sortent 1ère plaque P1 c'est avec vitesse  $V_{p1} \neq 0$ , d'où énergie  $\Rightarrow E_{p1} = (h\nu_{\text{photon}} - W) \neq 0$ , ( $W$  est énergie 'payée' par  $e^-$  pour s'extraire)

$\Rightarrow$  seuil:  $h\nu_{\text{photon}} > W = h\nu_0$

$V \neq 0$  freine  $e^- \Rightarrow e^-$  arrive à collectrice ( $V_{p2} \neq 0$ ) si  $E_{p2} = E_{p1} - qV > 0$  ( $q = +|e|$ )

$\Rightarrow V_{\text{stop}}$ : Inversement si  $qV > qV_{\text{stop}} = E_{p1}$ , les  $e^-$  ne peuvent arriver à P2.

mesure de constante  $h$  en variant  $\nu_{\text{photon}}$  et mesurant le  $V_{\text{stop}}$  associé:

$V_{\text{stop}} = (h/q) \nu_{\text{photon}} - (W/e)$  dix ans de vaines mesures par Millikan

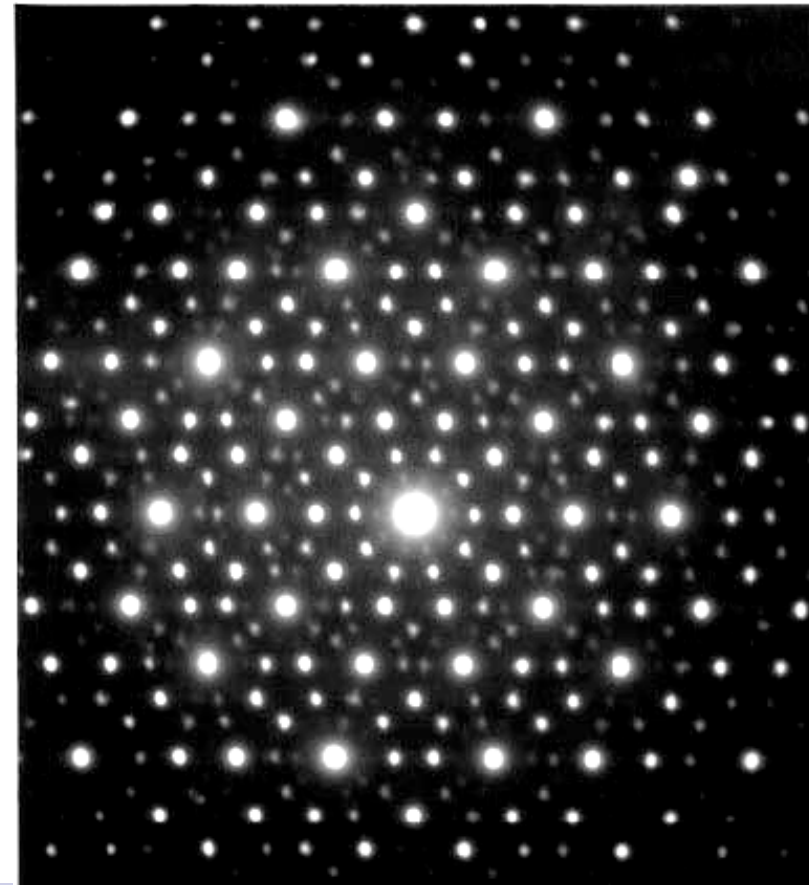
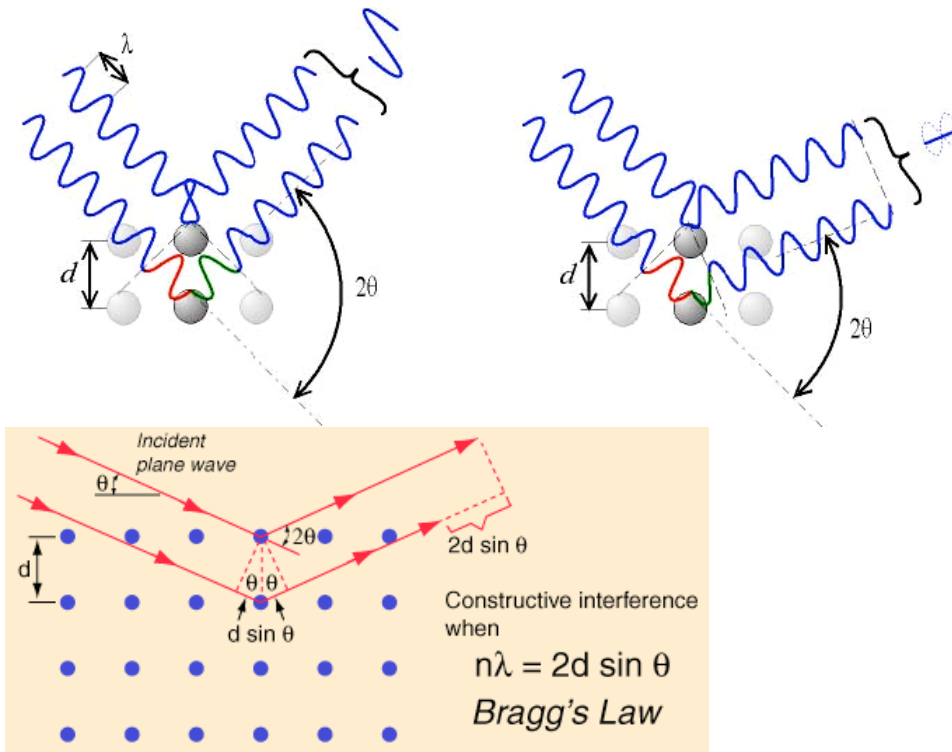
**Nobel pour Einstein en 1921**

\*il n'avait pas trouvé de poste en enseignement (Tiens, ça rappelle quelque chose!)

# Von Laue/Bragg

Von Laue (Nobel 1915) : Illumination d'un cristal par des rayons X  
⇒ apparition de figures d'interférence (⇒ nature ondulatoire des rayons X)

Technique perfectionnée par Bragg père et fils (Nobels 1916)



# Effet Compton



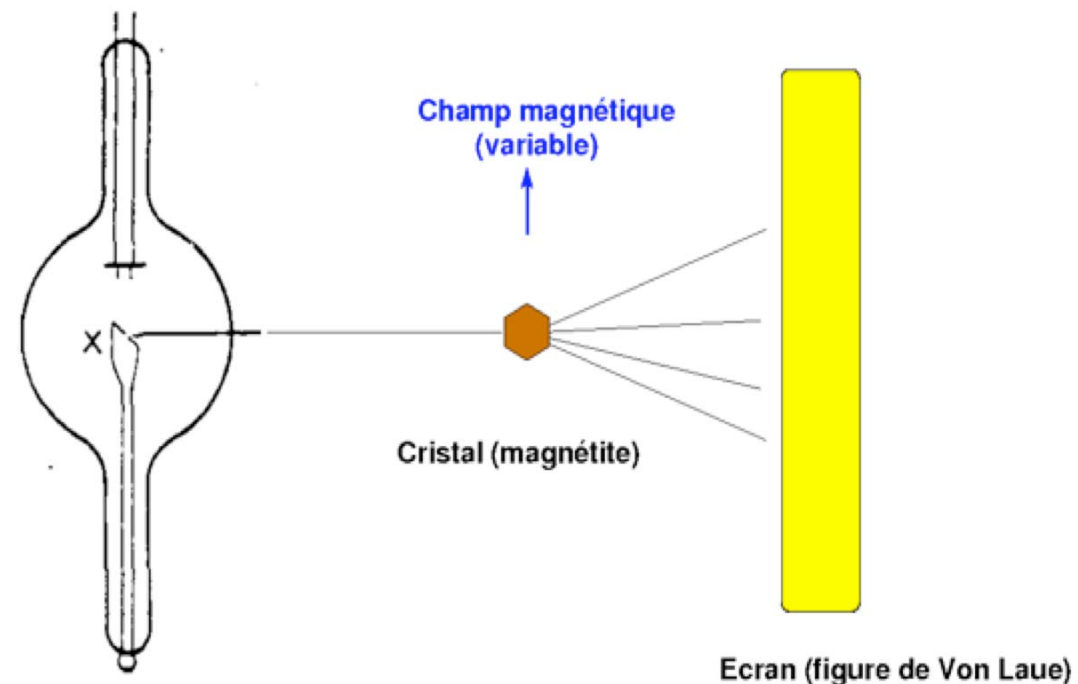
En 1916 :

- théorie électromagnétique "classique" encore très majoritairement supportée
- théorie quantique peu ou pas admise
- Compton veut à l'origine tester une théorie (Weber) sur la "particule magnétique" (qui suppose que c'est l'atome)

Résultats attendus : variation de la figure de Von Laue ...

Observation : pas de variation !

Conclusion : **les rayons X sont diffusés par les électrons**



Source de rayons X

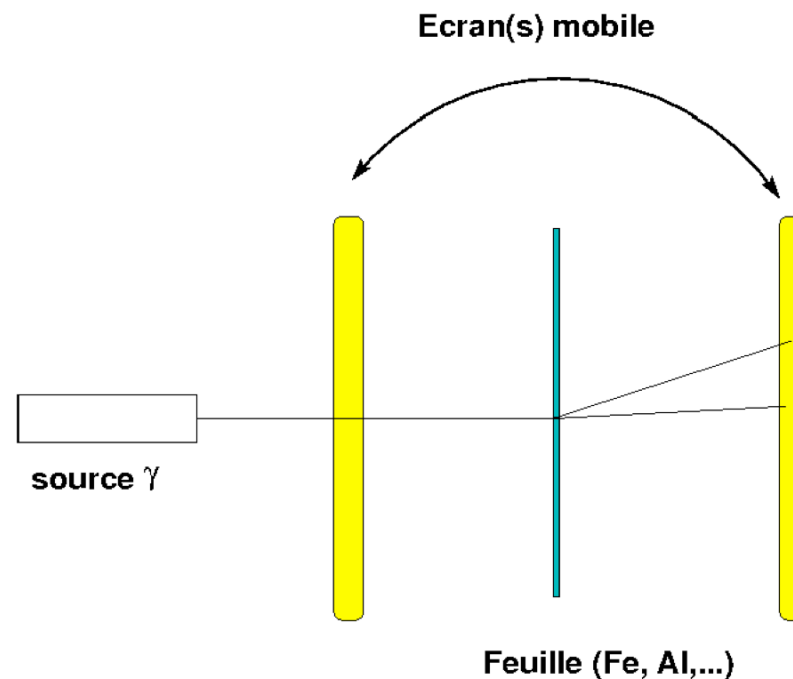
Ecran (figure de Von Laue)

## Effet Compton (2)

Série d'expériences pour comprendre la diffusion de X (et des  $\gamma$ )  
1ère question : les rayons difusés sont-ils identiques aux rayons Incidents ?

Réponse: NON (Compton, Gray 1917) !

Observation initiale avec les gammas : rayons diffusés + "mous"  
d'autant plus que l'angle de déflexion est grand ...



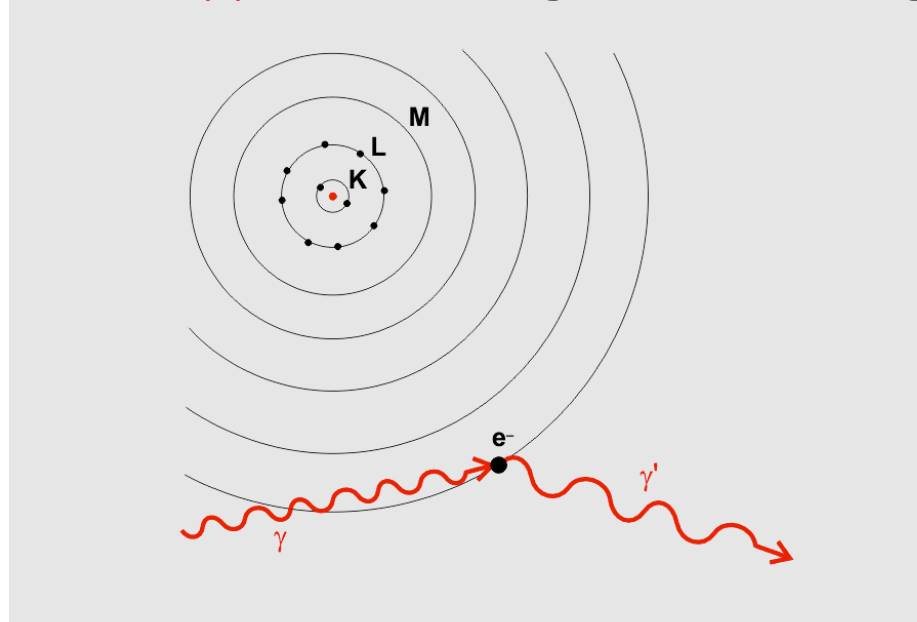
## Effet Compton (3)

1ère hypothèse de Compton : la diffusion ne change pas la longueur d'onde (optique classique !)

D'où nécessité d'inventer un mécanisme (semblable à la Fluorescence) pour l'émission d'un **nouveau** rayonnement :

Rayons primaires frappent les **e** puis envoyés vers l'avant à vitesse **Relativiste**

à grand angle : effet **Doppler**  $\Rightarrow$  changement de longueur d'onde

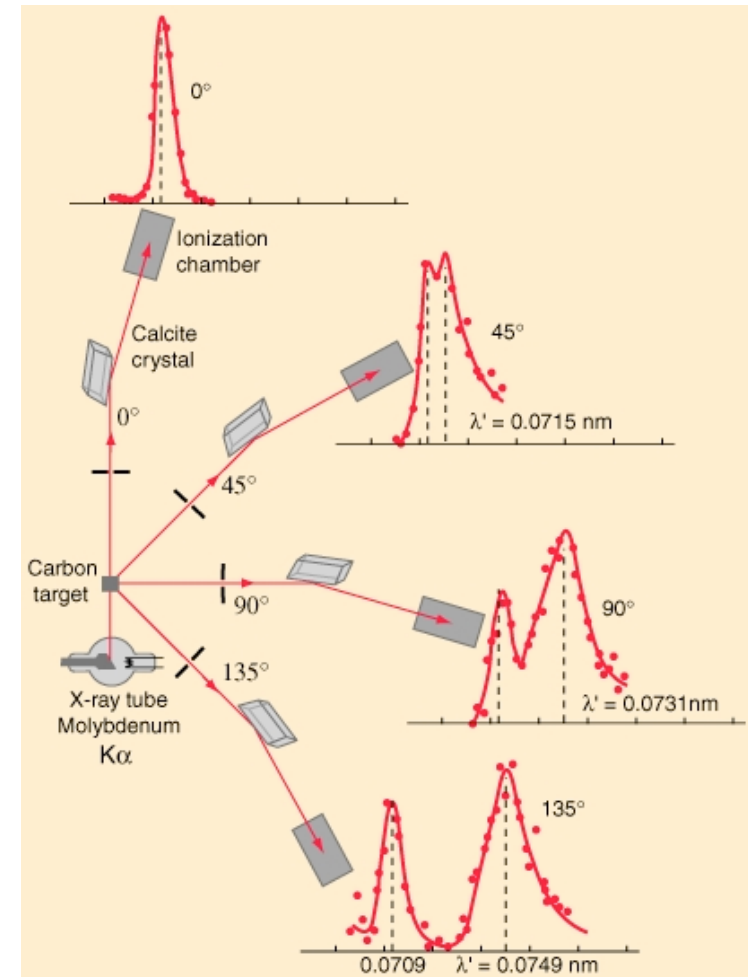




# Effet Compton (4)

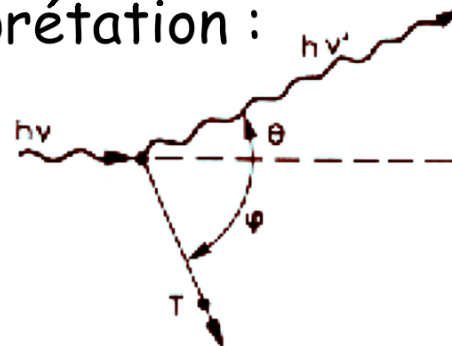
~1920 : est-ce qu'on voit la même chose pour les rayons X ?

- 1 Utilisation du mécanisme de Von Laue/Bragg → source de X mono-énergétique
- 2 Avril 1921 : observation de phénomène similaire (rayons diffusés + "mous")
- 3 Mais fin 1921 controverse expérimentale ⇒ nouvelles mesures (mesure du spectre des X diffusés toujours avec le dispositif de Bragg)



## Effet Compton (5)

- Décembre 1921 : article dans *Physical Review* → mesures mal reportées + interprétation qui confirme son modèle
- Octobre 1922 : article pour le *CNR* → réalise son erreur de lecture des mesures ... mais toujours le modèle faux!
- Novembre 1922 : réinterprétation :



**collision élastique** (avec transfert d'impulsion-énergie) entre 'corpuscule' de lumière (photon) et électron ("billard")

Impulsion du 'corpuscule' de lumière :  $p = h/\lambda$

→ variation de la longueur d'onde en fonction de l'angle de diffusion  $\Delta\lambda \propto (1 - \cos\theta)$

# Dualité Onde Corpuscule

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

Réciproquement

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

→ Longueur d'onde de De Broglie:

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

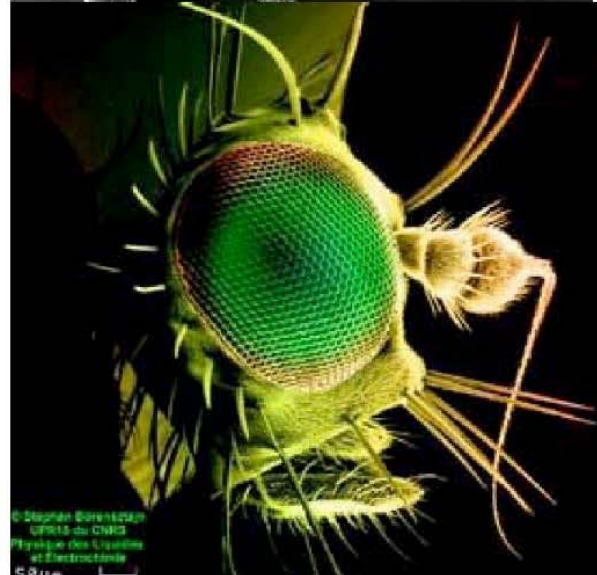
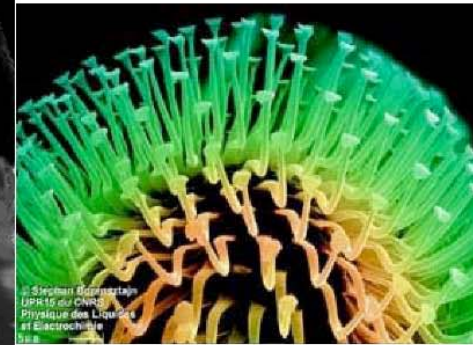
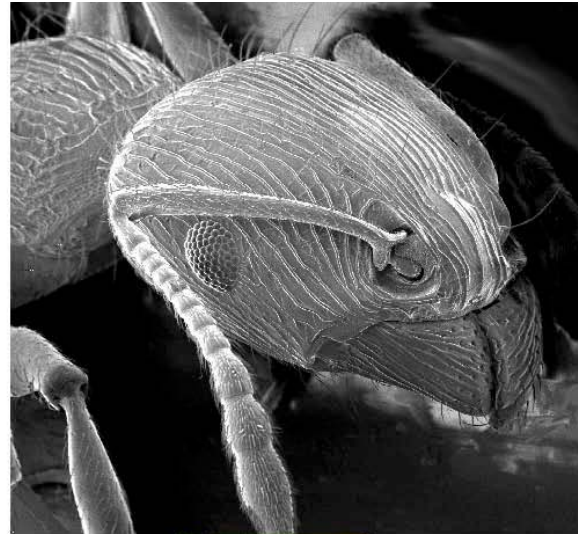
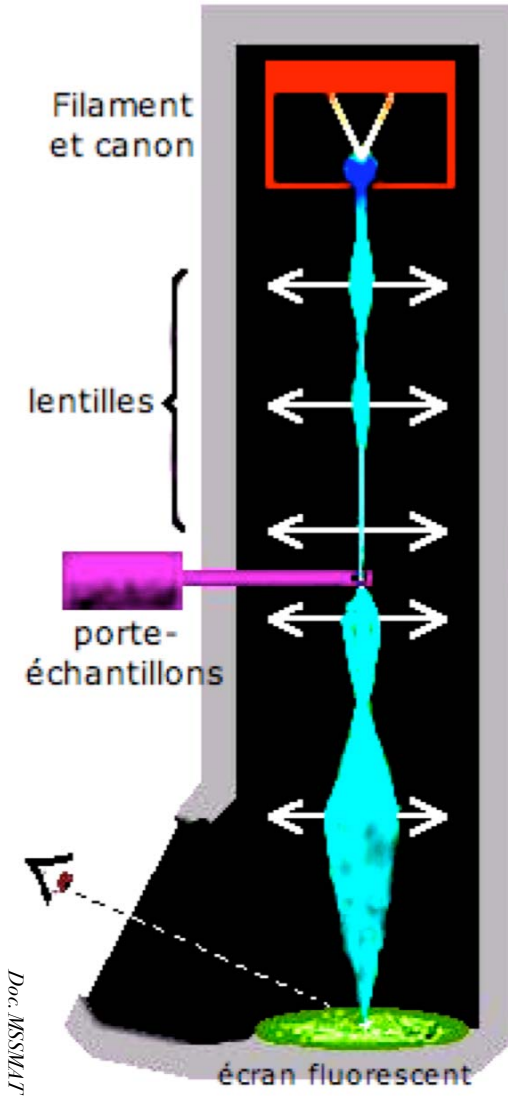
→ **petites échelles de distance** (physique 'microscopique')

Application microscopie électronique

Si particules  $\approx$  ondes → plus de localisation, 'trajectoire' non unique

**Fin du déterminisme**

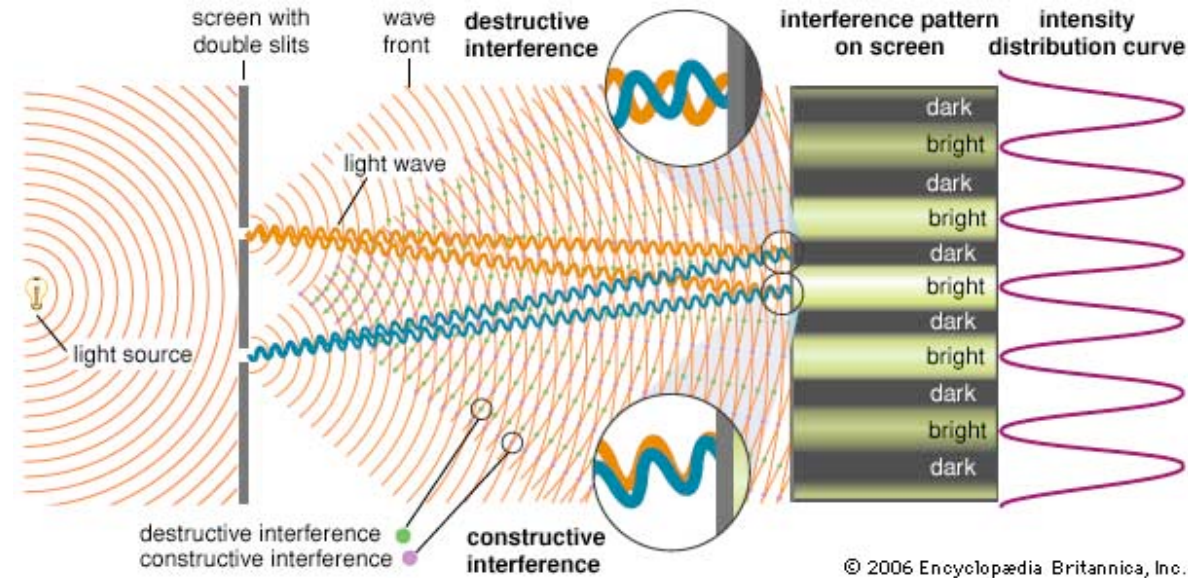
# Application: Microscope électronique



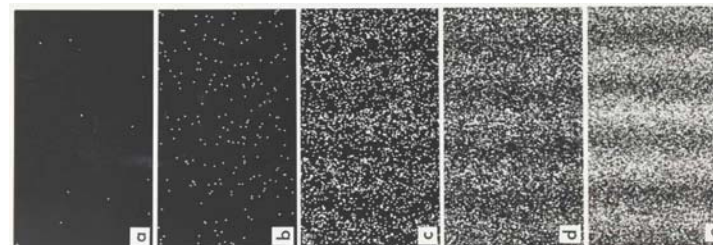
$\lambda \Rightarrow$  résolution  
e.m. (visible) ~ 500 nm  
e (150 eV) ~ 0.1 nm

# Expérience des 'trous d'Young'

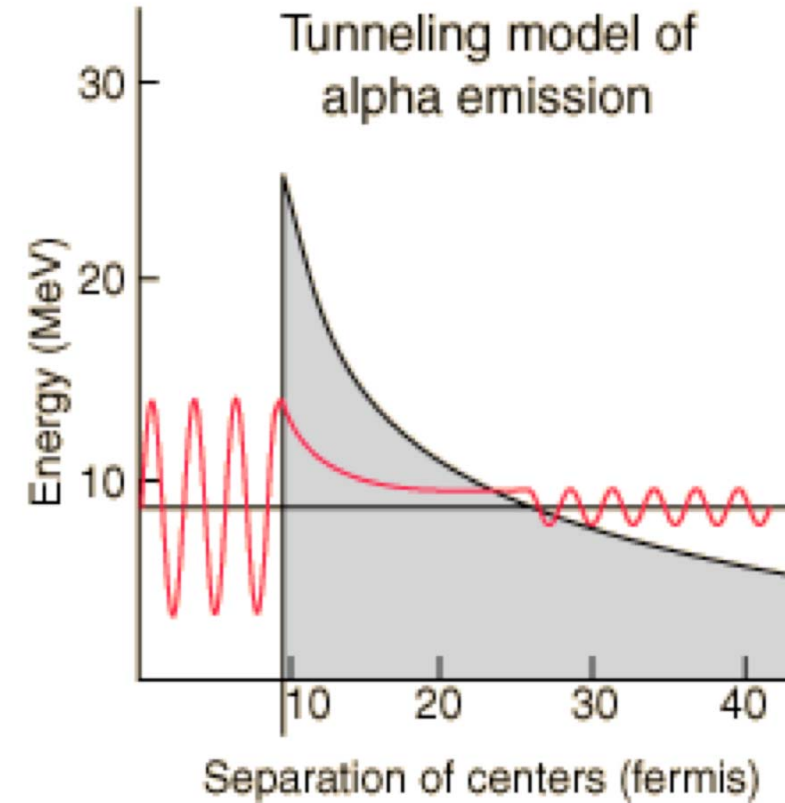
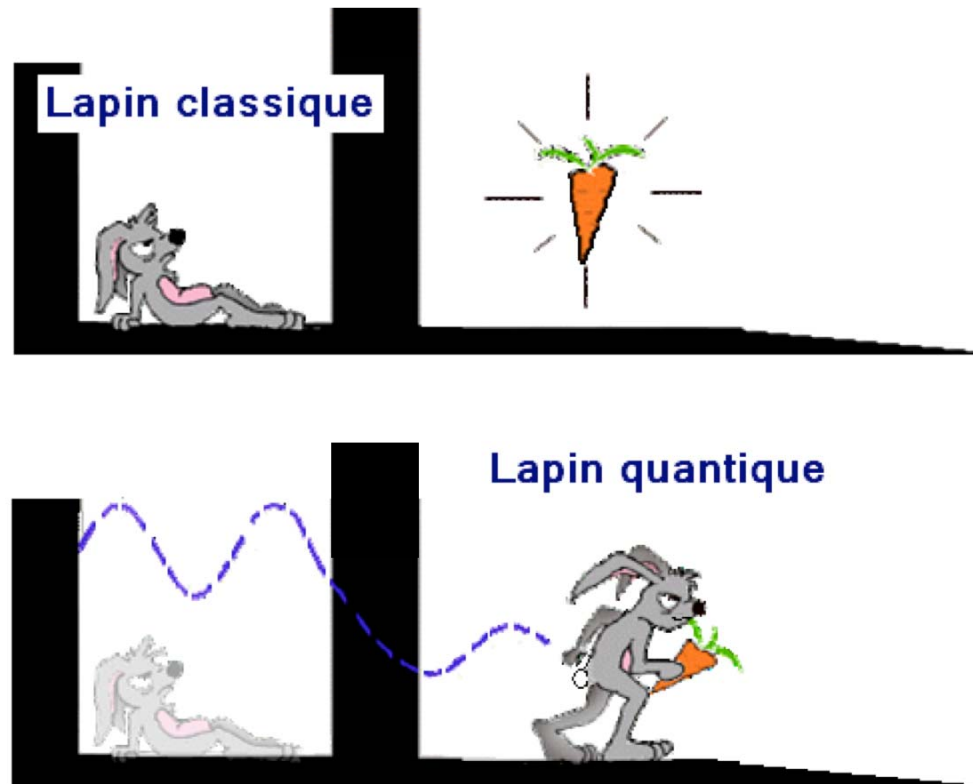
Expérience classique en optique (Young 1830)  
preuve de la nature ondulatoire de la lumière



Avec des électrons → apparition progressive des franges



# Impossible n'est pas quantique



lapin à partir de: [http://www.astrosurf.com/m80/documents/conférences\\_robert/basesnuclear.ppt](http://www.astrosurf.com/m80/documents/conférences_robert/basesnuclear.ppt)  
source image effet tunnel: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/nuclear/imgnuc/alphapolon.gif>

# Expérience de Franck et Hertz: 1914

But: mesurer précisément le potentiel ionisation du Hg

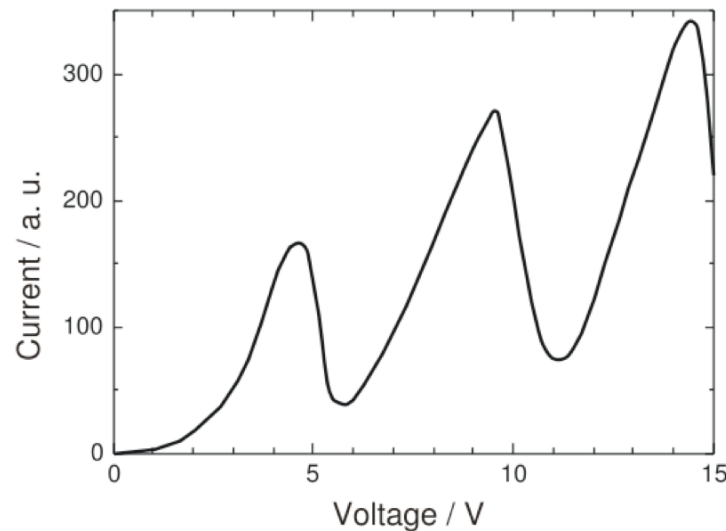
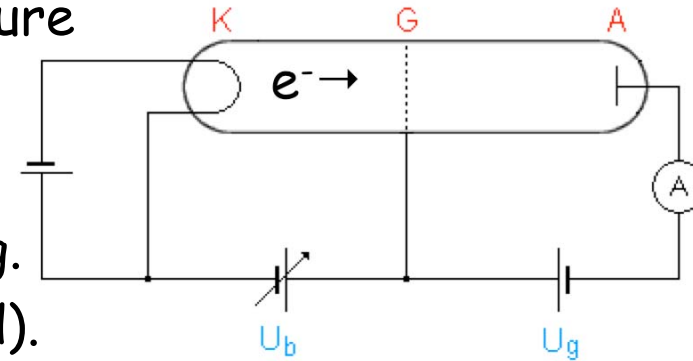
Dans tube: accélèrent  $e^-$  dans vapeur de mercure

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

Élastiques ou

Inélastiques si  $e^- \rightarrow$  énergie aux atomes Hg.

Mesurent énergie  $e^-$  grâce à grille (cf Lennard).



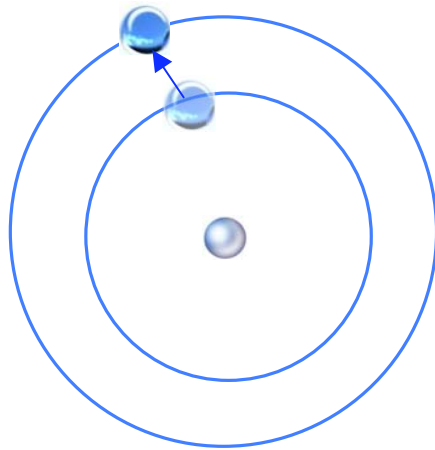
Plusieurs fois même structure:  
#  $e^-$ : ↗ (élastique) jusqu'à 4,9V puis  
↘ inélastique,  $e^-$  ont cédé 4,9V.  
Donc:  $E_{\text{ionisation}} = 4,9\text{V}$

Ils publient...

**C'est faux !**

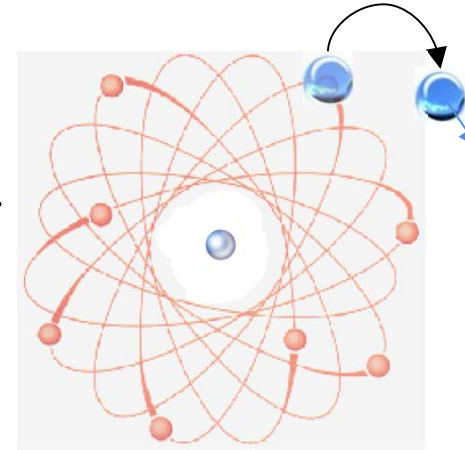
# Pas ionisation mais excitation:

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



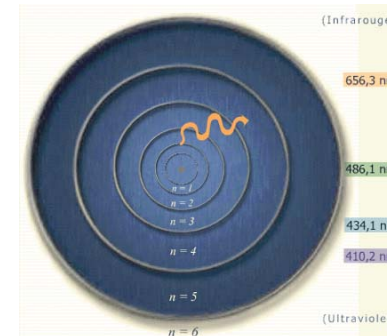
Ils n'ont pas mesuré l'énergie d'éjection d'un  $e^-$  dans atome version Rutherford  $\Rightarrow$

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



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

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





# 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 ...

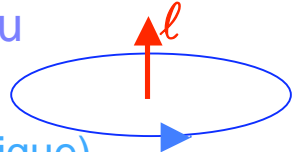
Pour s'y retrouver :

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

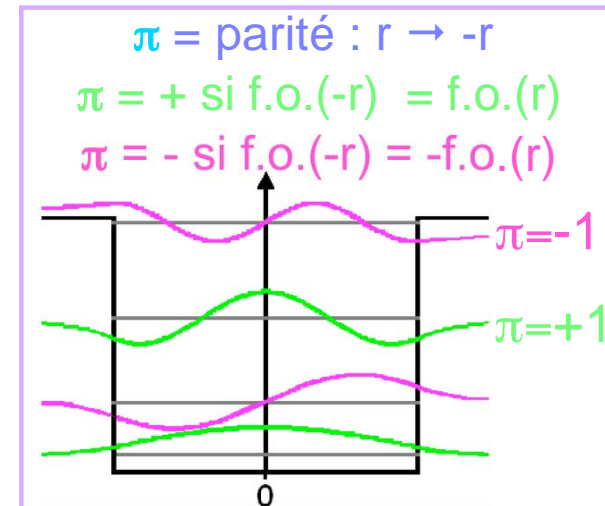
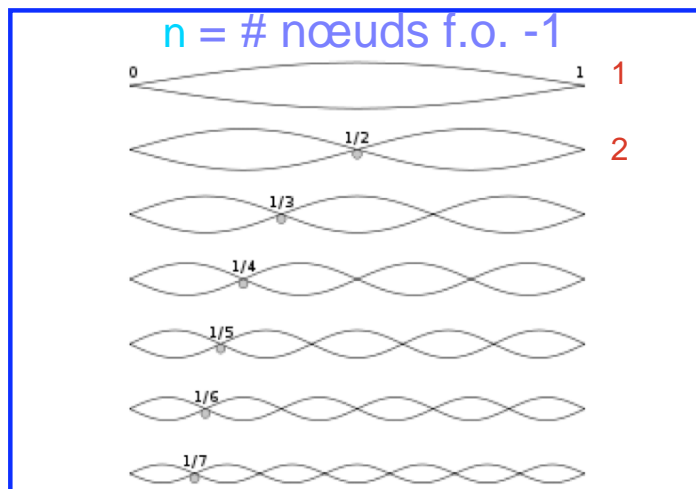
# Exemples de nombres quantiques:

Associé à l'aspect corpusculaire:

$\ell$ : # quantique azimutal ou moment angulaire orbital (en classique: moment cinétique)  
s, p, d, f, g, h... pour  $\ell = 0, 1, 2, 3, 4, 5...$



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>

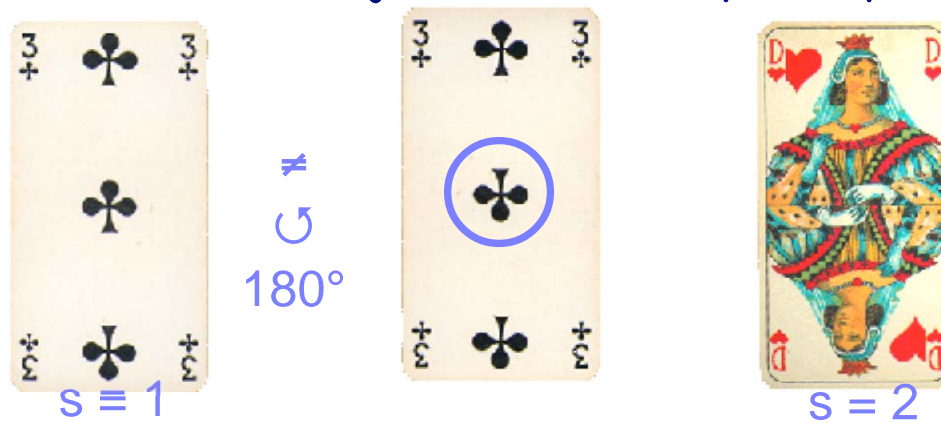
fonction onde paires impaires <http://www.univ-lemans.fr/enseignements/physique/02/divers/qpuits.html>

# Un "nombre quantique" quantique :

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



$s = \frac{1}{2} \Rightarrow$  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  $\frac{1}{2}$**  entier, les nucléons (composites: protons, neutrons), électrons, neutrino, quarks.

L'autre famille, les **bosons**, eux, ont un **spin entier** (ex: 0 higgs, 1 photon)

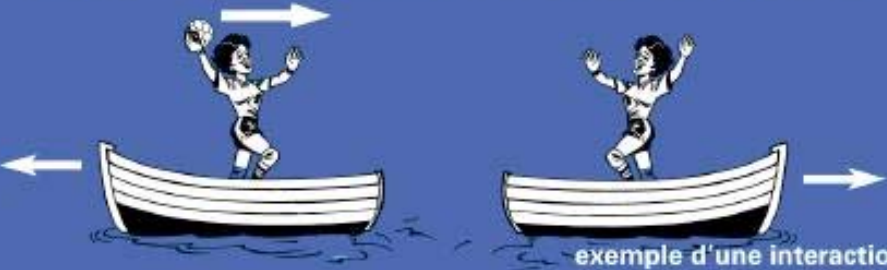
# Description quantique d'une interaction

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

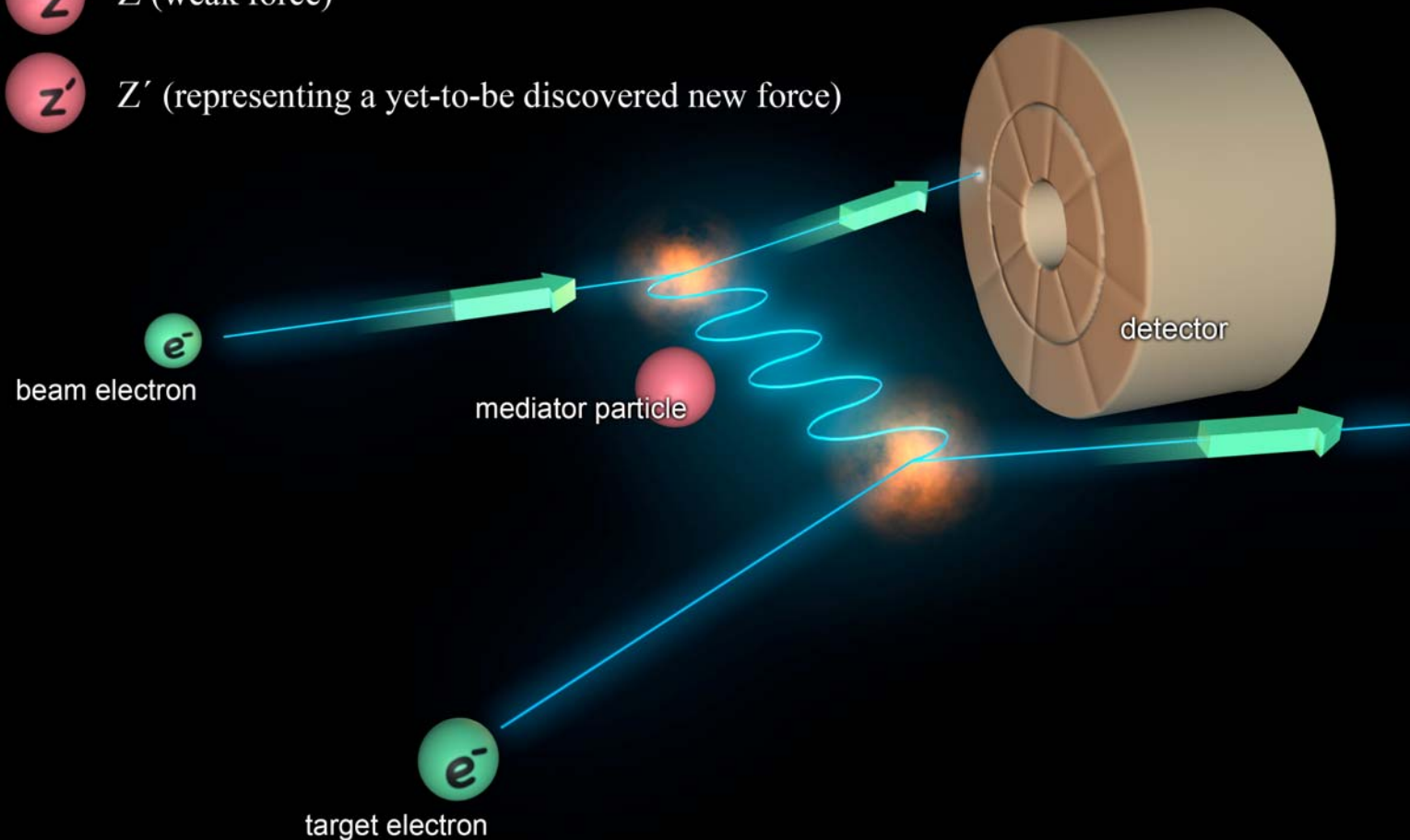
TYPE	FORCE RELATIVE	PARTICULES ÉCHANGÉES	EXEMPLE DE DOMAINE D'APPLICATION
FORTE	$\sim 1$	gluons	noyau, nucléons
ÉLECTROMAGNÉTIQUE	$\sim 10^2$	photons	cortège électronique de l'atome, lumière, chimie
FAIBLE	$\sim 10^4$	bosons $Z^0, W^+, W^-$	radioactivité $\beta$ énergie solaire
GRAVITATION	$\sim 10^{-38}$	graviton ?	pesanteur systèmes planétaires

T10

# 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)



# Conclusions

Nature corpusculaire des ondes électromagnétiques  $E = h\nu$

Nature ondulatoire des corpuscules  $\lambda = h/p$

Forces quantifiées particules médiatrices

Théorie non déterministe, aspect probabiliste: effet tunnel

Nombre quantiques

