

Introduction à la Physique Moderne:

I. Deloncle et O. Perdereau

Plan du cours

I - Prologue: éléments de physique classique:

lumière, électromagnétisme, dynamique

II - Intro: une conférence

III - Cheminement vers le monde quantique

- le corps noir

- l'effet photoélectrique: un petit coup de pouce

- Atome de Bohr et Kirchhoff

- Dualité onde-corpuscule: du visible aux 'rayons' X, puis à d'autres particules ...

- des nombres pour des propriétés quantifiées

IV - Cheminement vers la relativité:

- contraction espace

- dilatation des temps

- masse au repos, masse en mouvement

Le tout début de la physique moderne

1632: Galilée, "Dialogue sur les 2 grands systèmes du monde"

Mouvement lié au temps: vitesse (variation position avec t)

Principe d'inertie: "Nente si muta" (Rien ne change)

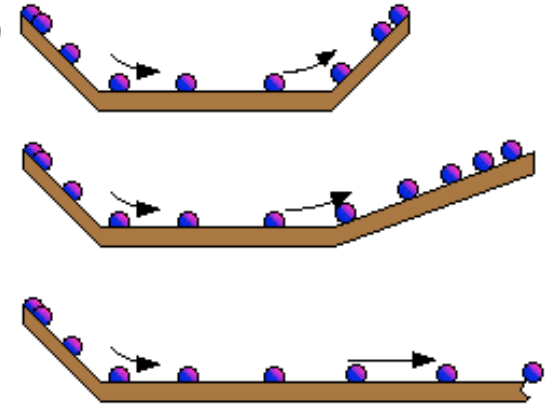
Propriété des corps à conserver un mvt à $v=c^{ste}$

si aucune force n'agit sur lui.

(pour Galilée cela n'est vrai que sur un support

sinon les corps chutent...tous à la même

vitesse moyenne)

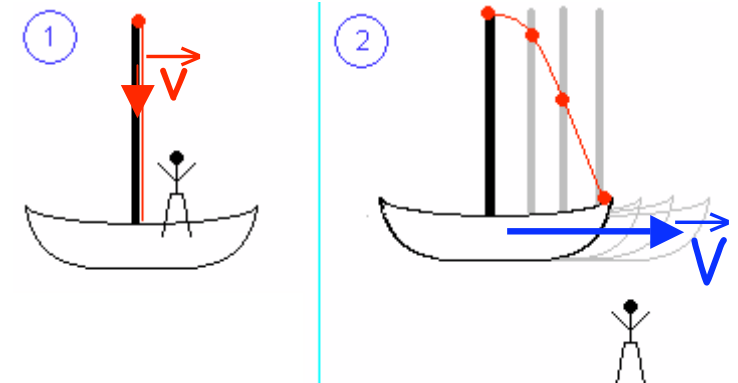


Principe de relativité Galiléenne:

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

Pour la mécanique : ($v = c^{ste}$) \equiv ($v = 0$)

c'est simplement RELATIF.



Composition
vitesse

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

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

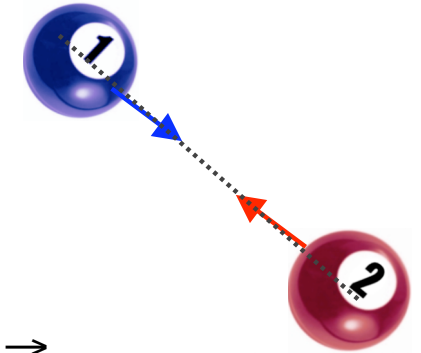
Vitesse: conservation

1633 (pub. 1644) Descartes "Traité du Monde et de la lumière"

Lois des chocs (élastiques)

'Action' dans le choc dépend de m et de v .

Etudie $f(m,v) = mv = p$, quantité de mvt (impulsion),
énonce sa conservation lors du choc



1652: Huygens centre de masse $G \Rightarrow$ réf. Galiléen: $\sum m\vec{v} = \vec{P}_G = M_G\vec{v}_G$

Mesure et démontre conservation de $(\vec{P}_G)_{\text{avant}} = (\vec{P}_G)_{\text{après}}$

Puis d'une autre quantité: $f(m,v)=mv^2$ plus pertinente:

Dans explosion $\vec{p} = \vec{0}$, pourtant il y a du mouvement
en quantité...



Newton: force est accélération..

calcul infinitésimal dt: v vitesse, a accélération, 'instantanées'

🌍 1^{re} Loi (Prouve Principe inertie) $\vec{v}(t) = \vec{v} = \overrightarrow{cst} \Leftrightarrow \sum \vec{F} = \vec{0}$

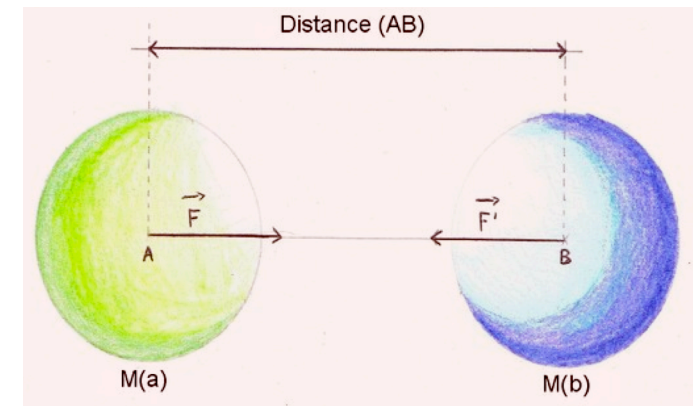
🌍 2^{ème} Loi: Principe Fondamental Dynamique (PFD) $\sum \vec{F} = m\vec{a}$

Rq: PFD \Rightarrow conservat° si sys isolé (aucun champ E, B ou G)

mv

$1/2mv^2$ 'énergie cinétique'*

🌍 Principe interaction (actions réciproques)
F instantanée, à distance, intensité en $1/d^2$
 \Rightarrow Loi de la gravité

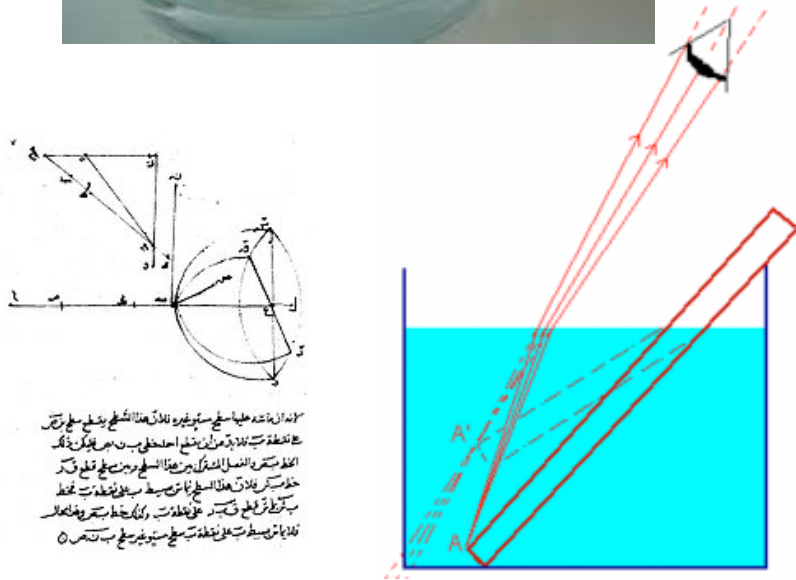


🌍 Quatrième corollaire: Principe de Relativité
2 référentiels Galiléens identiques pour la physique \Leftrightarrow Eq. PFD identique

* Appellation Young 1807

Réfraction et Diffraction de la lumière

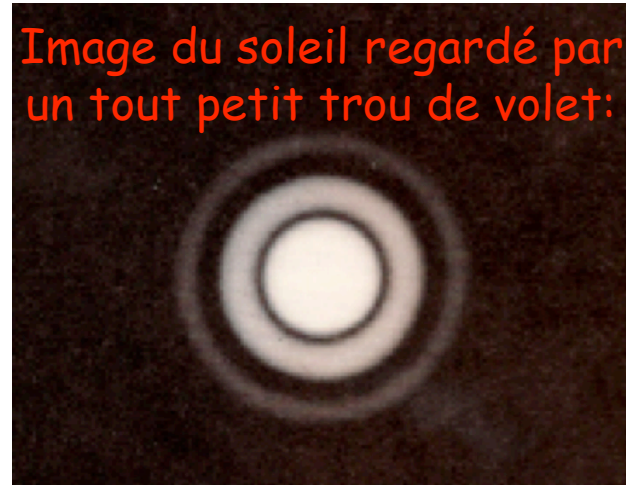
Réfraction:
fracture rayon lumineux



Loi Réfraction : Ibn Sahl,
Bagdad (940 et 1000)

Petites manips refraction/diffraction à la pause

Diffraction: Plus qu'une fracture



l'onde 'éclaire' loin derrière obstacle



Observat° et Analogie:
Grimaldi < 1665

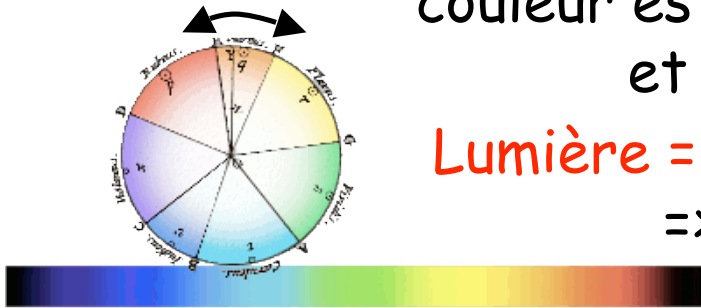
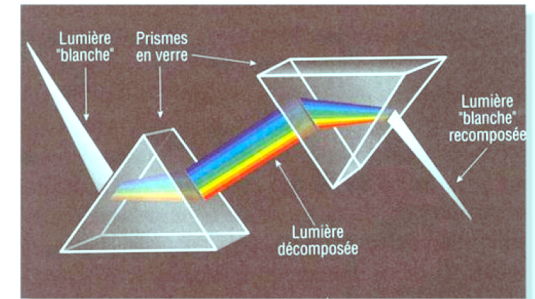
Lumière: 17ième siècle, une 1ère bataille fait rage

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'

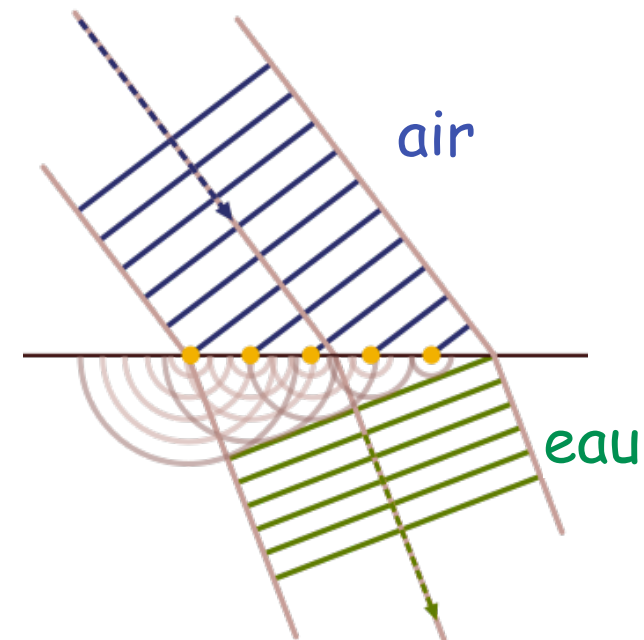


Réfraction corpuscules: vitesse dans eau > vitesse dans air

2) Huygens 1678

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

Réfraction onde: vitesse eau < vitesse air

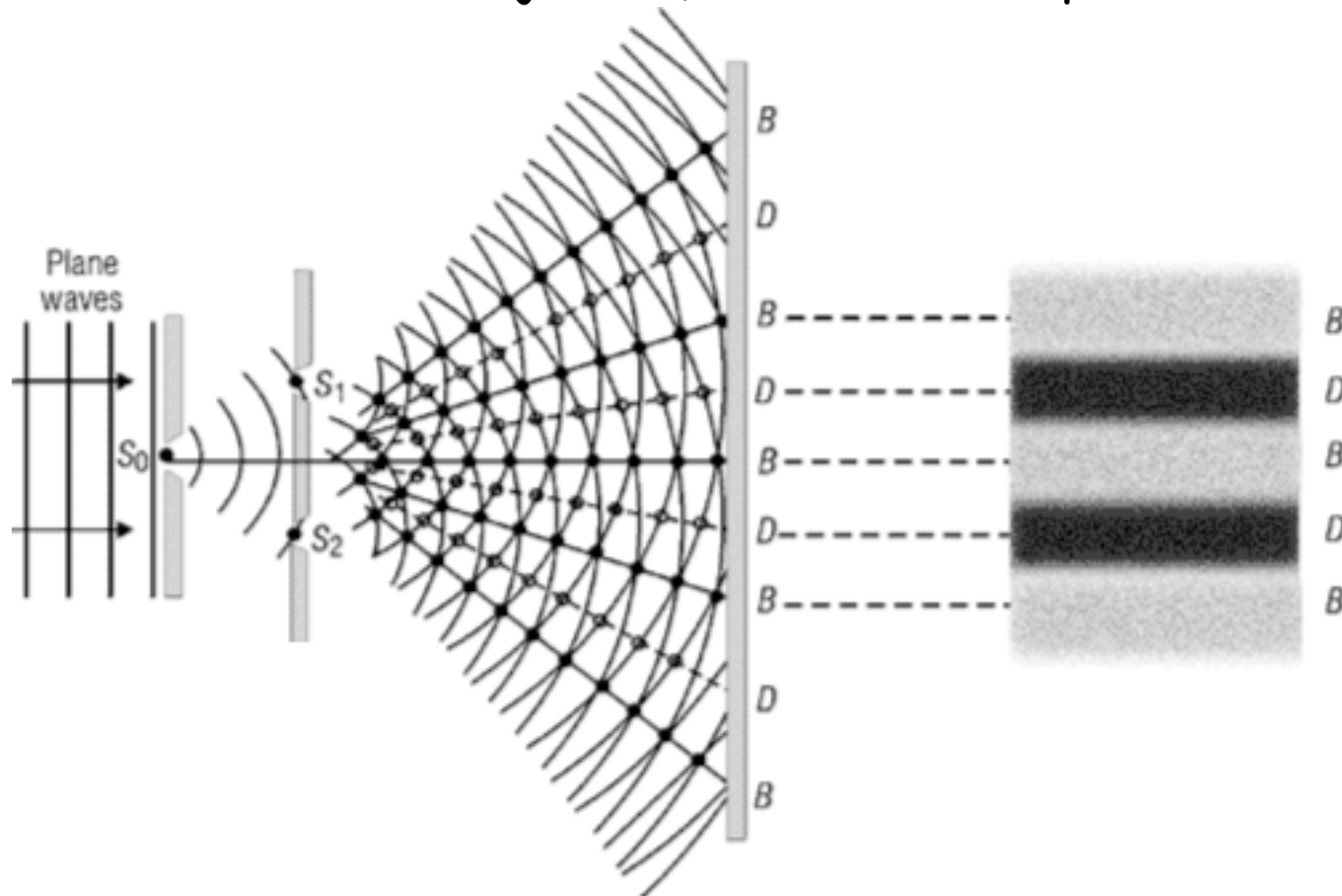


7*: en accord avec ordre du monde (selon les grecs: 7 tons en musique, jours de semaine et astres (hors Terre) dans le ciel...
*lequel Descartes avait pourtant une interprétation corpusculaire: impulsion transmise de proche en proche dans ether

Newton l'emporte par notoriété mais bientôt...

1781: *Herschel* trouve Uranus => 6 planètes (en dehors Terre)
6+ Soleil+Lune = 8 (dommage Mr Newton)

1803: *Thomas Young* avec un 'rayon de soleil' par un trou dans le volet et deux fentes dans carte à jouer (=> diffraction petit trou/ fente)

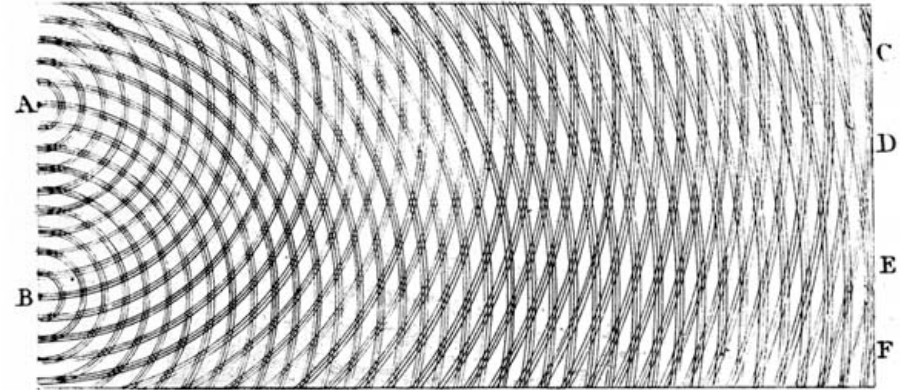


Young, Fresnel, Foucault...

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



Interférence

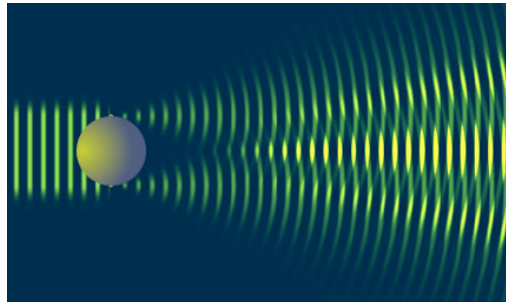


T. Young, Philosophical Transactions of the Royal Society of London, vol 94 (1804)

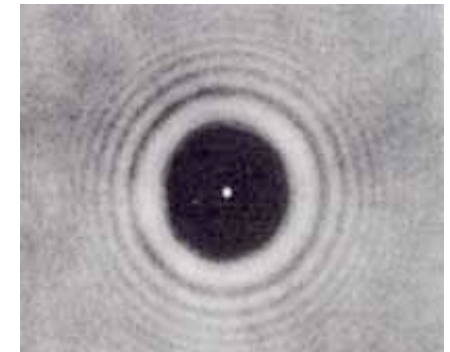
Corpuscules avec effet de bords (Newton):
motif régulier après collisions !!!???

1819 : Fresnel

=> Poisson



Lumière au centre
d'une ombre ? => 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 ...

Magnétostatique:

Corps aimantés, aimantables



Age fer



Chine
(II^e siecle)

Première étude
'Scientifique'
Gilbert 1600

Électrostatique:

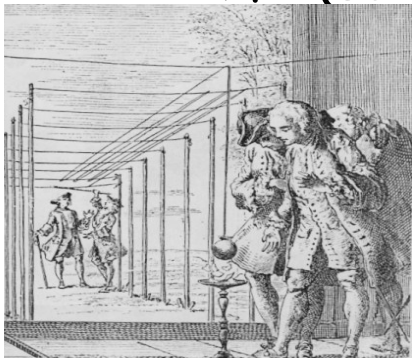
Corps chargés



Ambré frotté Thalès (-625)

Electrodynamique:

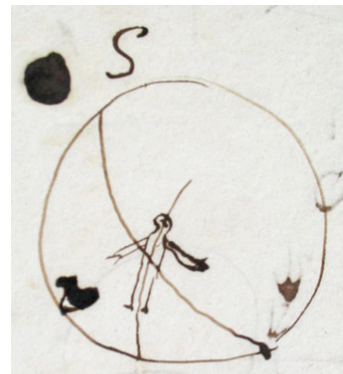
1729 Gray - 1743 Franklin
Communication d'électricité
(succession de décharges)
via fil (soie, laiton)



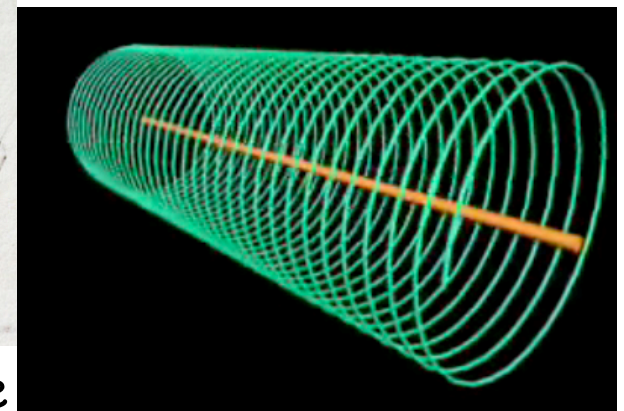
Etape importante
Découverte
de la pile
Volta (1800)

Lien à magnétostatique:

1820 Ørsted
Communication d'électricité
=> force magnétique "tubulaire"

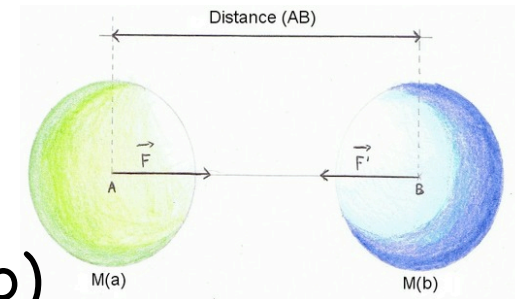


1820 Ampère



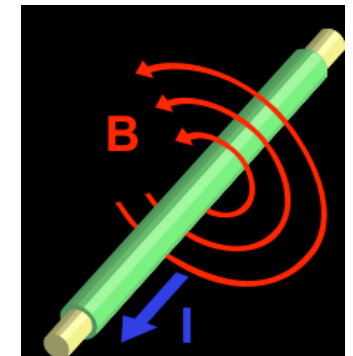
Pas de parallèle, plutôt désorientant...

Newton: Principe d'**interaction** (actions réciproques)
Instantanées, à distance, intensité en $1/d^2$,
issues de prop. statiques telles masse (gravité)
Charge électrique (force électrostatique, 1785 Coulomb)



1820: Biot et Savart: tout n'est qu'aimant
Tranches de fil deviennent des aimants
=> Force Magnétostatique et $1/d^2$

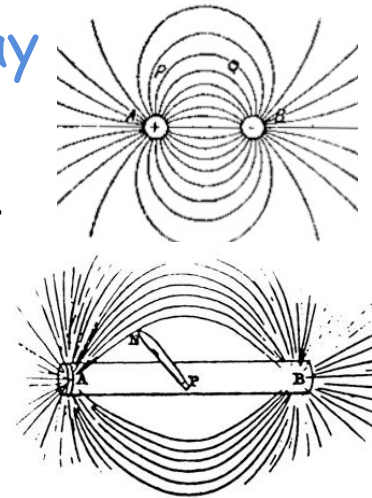
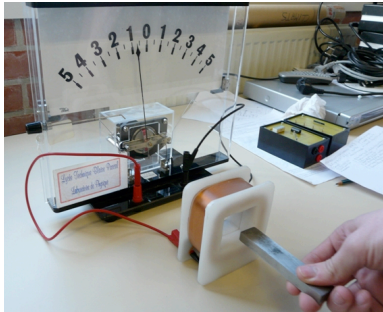
1820: Ampère : tout n'est que **courant électrique**
nouveau type de force issue de prop. dynamiques
force entre courants, en $1/d^2$
Tranche d'aimant = élts de courant coaxiaux
=> Force Electrodynamique



Pas parallèles, plutôt perpendiculaires...

1821-31 : Faraday

Récaproque 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

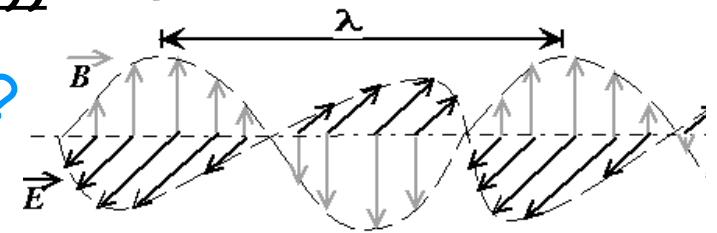
1864 Maxwell: "On the Faraday's lines of Force" (+Ampère)

Equations champ ElectroMagnétique ($\vec{E} \perp \vec{B}$) et Force EM

- charges (statique) et/ou variat° de B ($B(t)$) ⇒ E
- courant (dynamique) et/ou variat° de E ($E(t)$) ⇒ B

Si ni courant ni charge ?

Eq. de mvt: E, B fcts sinusoidales, **une onde !**



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

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

⇒ **La lumière est une telle onde électromagnétique (dans éther ???)**

Maxwell versus Newton/Galilée

□ Accord :

✓ sur existence de l'éther

□ Désaccord:

✓ vitesse lumière finie => interaction pas instantannée

✓ Équations Maxwell pas invariantes dans chgt réf. Galiléen

⇒ Soit principe invariance Galilée/Newton faux ...

⇒ Soit la transformation des équations de Maxwell
lors d'un chgt de repère n'est
pas celle que l'on croit

Patience, vous aurez la réponse tout à l'heure.....

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 ?

1900: 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 révolutions vont naître des deux nuages (incompatibilités) de Lord Kelvin:



Entre Thermodynamique et 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)**

*aujourd'hui on dirait unifiées

Energie/chaleur (thermodynamique) et Lumière: Nature de la lumière des corps chauds ?

1854-1858: Kirchhoff

→ gaz **raies discrètes** : absorption (si froid) ou émission
→ Identification élts (1869 Angström)

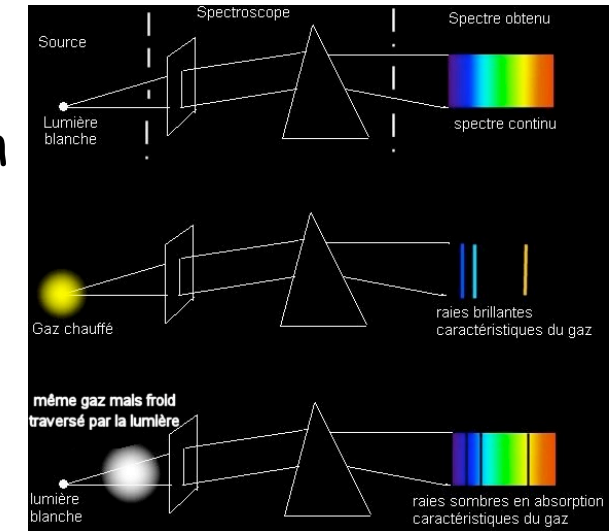
→ solide : **spectre continu** : rayonnement thermique

Tout Corps dense chaud émet selon $f(T, \lambda) = ???...$

indépendante de sa forme, etc.

→ Invention du concept théorique de **CORPS 'NOIR'**

Absorbe et réémet 100% des radiations. En particulier la lumière qu'il émet ne provient pas d'une source lumineuse extérieure (ni transmission, ni réflexion) mais de son seul état thermique (ex: pas de sa géométrie).

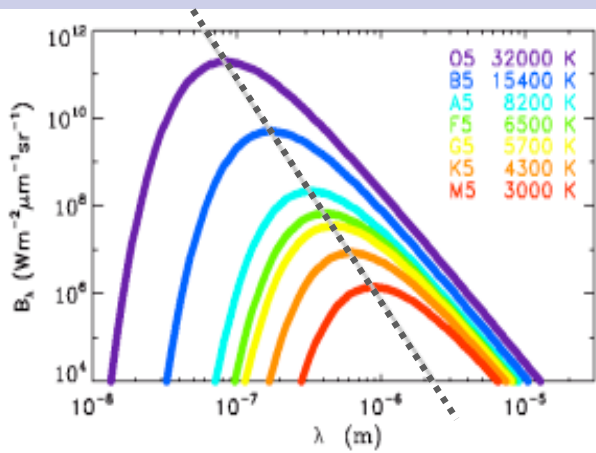


⇒ rayonnement thermique et parois sont en équilibre thermique à T
Pour les mesures Kirchhoff propose 1 boîte avec 1 petit trou

1879 Loi de Stefan

$$\text{Puissance lumineuse} = c^{\text{ste}} T^4$$

Thermodynamique (statistique gaz) et Lumière: deux modèles



1893-1896: Wien

→ loi du déplacement spectral:

$$\lambda_{\max} \propto 1/T$$



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.

→ établit une formule empirique $f_{\text{Wien}}(T, \lambda)$
justifie par analogie gaz: loi probabilité énergie

1900: Rayleigh

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

ondes stationnaires par unité volume
chacune a l'énergie moyenne
des particules dans gaz à T

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

Représentation d'une onde
par une fonction



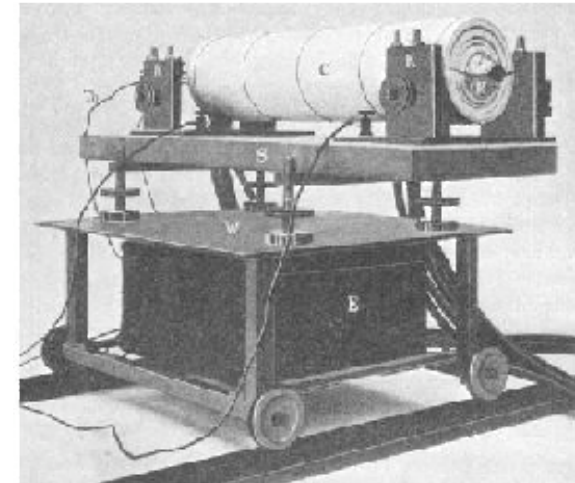
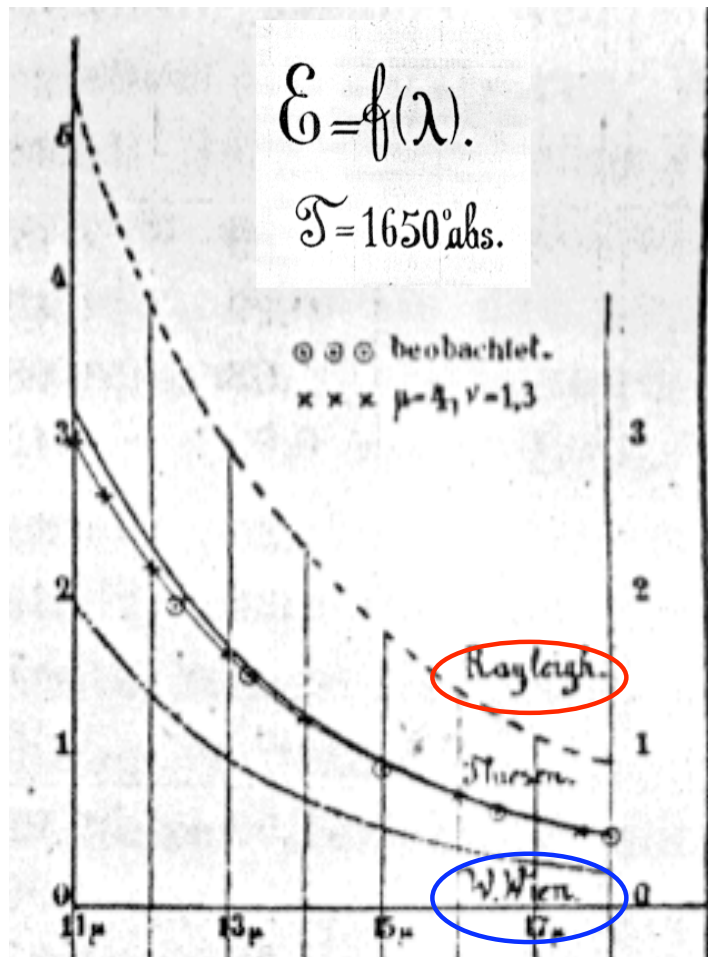
point rouge = nœud

Distance entre 2 crêtes = λ

Thermodynamique et Lumière: des avancées expérimentales

1900: Lummer et Pringsheim

améliorent leur corps noir et mesurent...des désaccords



Corps noir de Lummer et al. 1898:
Cylindre (feuille) e platine dans un tube céramique

En plus, physiquement:

- Wien: $f \rightarrow 0$ pour $\lambda \gg 1$
 - Rayleigh $f \rightarrow \infty$ pour $\lambda \ll 1$
- "Catastrophe violette"*

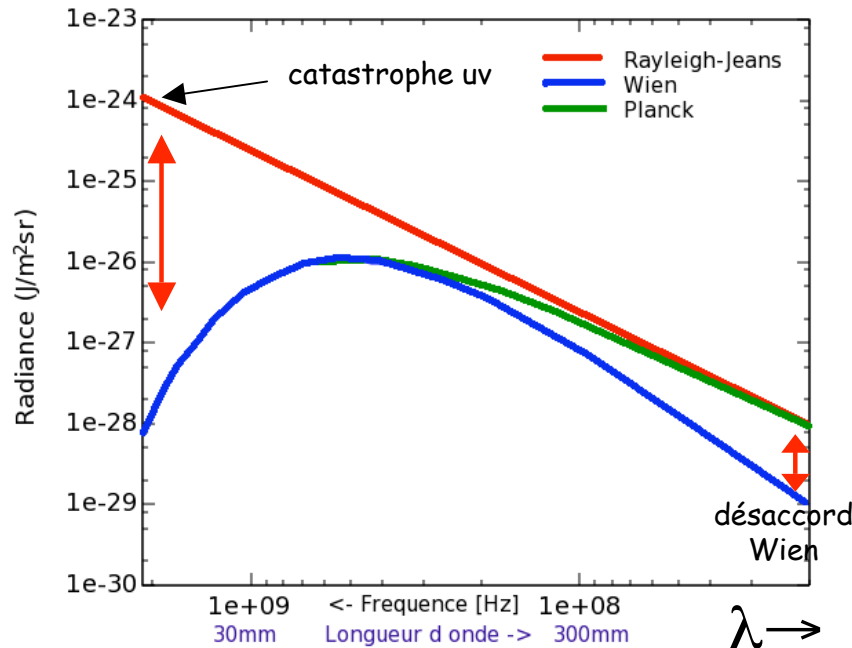


* Ehrenfest 1911

1900: Révolution du corps noir quantique

Planck (élève de Kirchoff)

-19 Oct.: accord pour toute longueur d'onde : si on ajoute un -1 à Wien



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

-14 Déc. Rayleigh devient Wien corrigée si

Énergie par quantum ε , mode n $E = n\varepsilon$, méca. stat. $\Rightarrow \bar{E} = \frac{\varepsilon}{e^{\frac{\varepsilon}{kT}} - 1}$

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

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

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

Difficile de faire mieux mais...

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

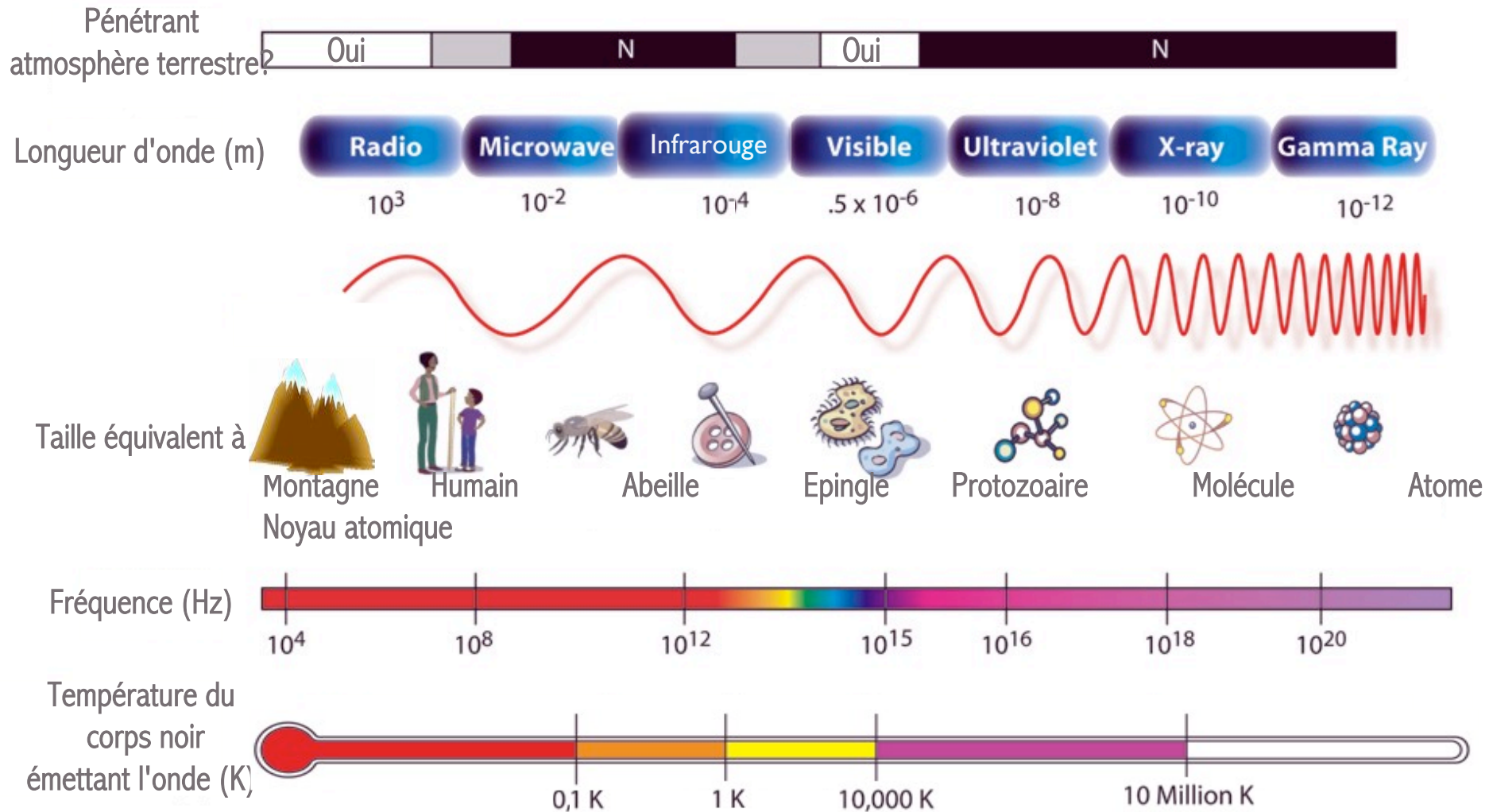
"...Mes vaines tentatives pour ajuster le quantum élémentaire d'action d'une manière ou d'une autre au cadre de la physique classique se poursuivirent pendant un certain nombre d'années et elles me coûtèrent beaucoup d'efforts. De nombreux collègues trouvèrent qu'il y avait là quelque chose qui frisait 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)

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...

Spectre électromagnétique et corps noir



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)

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

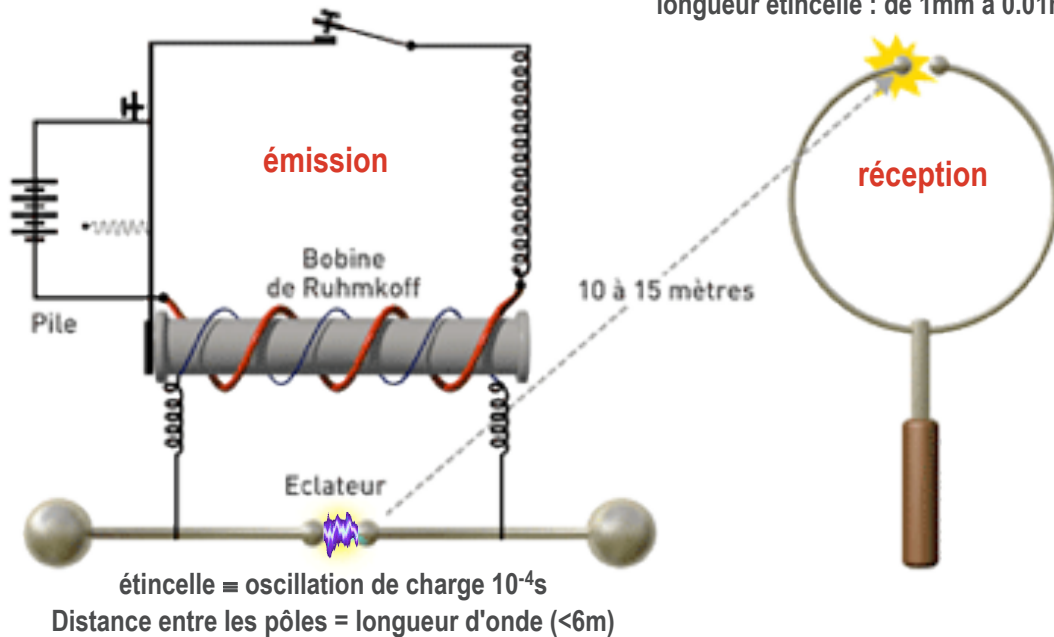


Figure 3. Photograph of equipment used by Hertz. Laboratory equipment, plus apparatus designed by Hertz and built with his mechanic assistant, Julius Amman (shown in Munich in

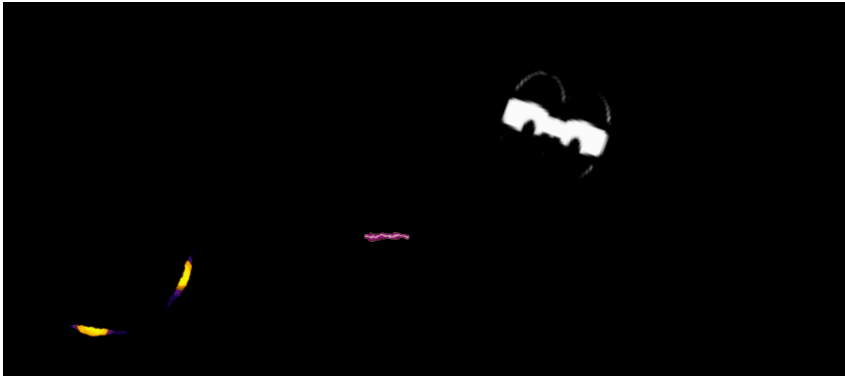
Il y a bien des ondes EM, elles peuvent être émises et reçues et telles la lumière être réfléchies, réfractées, polarisées...

*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^{nde} étincelle
⇒ récepteur dans boîte noire



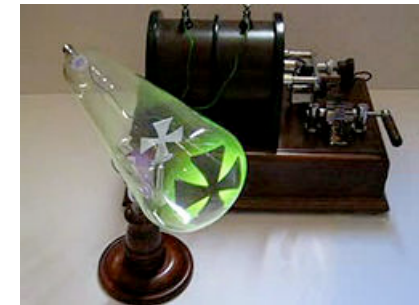
...et il la voit moins bien : +rare, + petite...!!!
écran entre émetteur et récepteur
verre, mica, gaz houille ⇒ tjrs diminution
quartz ⇒ retour de l'étincelle

⇒ est favorisée par les UV

Publie sans explications et retourne à Maxwell

1879-1895: Crookes et J. Perrin

Ombre Tube à vide Crookes (filament chauffé, HV)
corpuscules $q < 0$ libérés par HV ('électrons' 1894)



1897: Thomson

Effet de Hertz \Leftrightarrow électrons (1894) libérés par UV
⇒ vibration de charges du classique tjrs...

Effet de Hertz = Effet photoélectrique

1902: Lenard

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

I mesure le # d' e^- qui ont atteint collectrice malgré V.

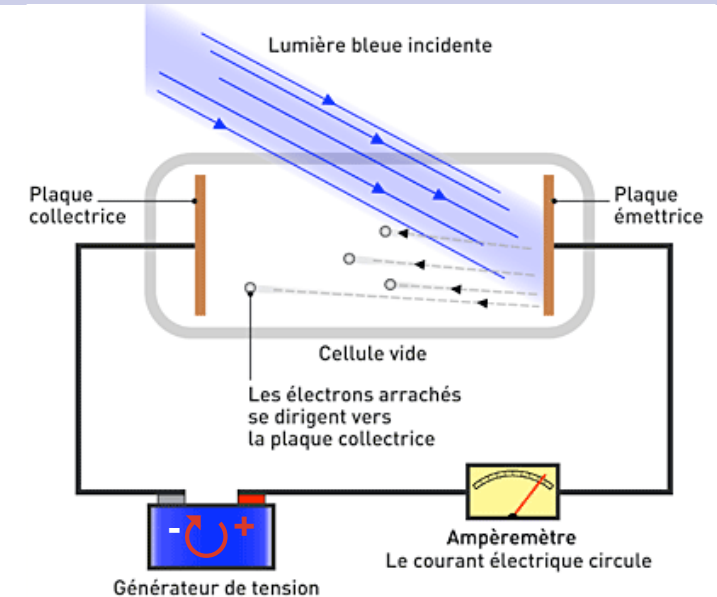
Mesure V_{stop} qui arrête les e^-
 \Rightarrow énergie cinétique e^-

Observations:

V : stop net I " \perp " et non " \curvearrowright "

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

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



GROS, GROS PROBLEMES:

- ❗ Onde classique énergie = Luminosité : mais ici énergie = $f(1/\lambda)$, observée
- ❗ seuil (pas d' e^- pour $\lambda > \lambda_{\text{max}}$) !!!
- ❗ émission instantannée
- ❗ λ_{max} dépend du matériau pas de l'onde incidente...

1905: Année d'Einstein (4 publications)

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.

Echanges 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 $E_\nu = h\nu$

$\Rightarrow E_{p1} = (h\nu_{\text{photon}} - W) \neq 0$, (W est nécessaire par e^- pour s'extraire)

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

Nobel pour Einstein en 1921

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

Expérience de Franck et Hertz: 1914

But: mesurer précisément le potentiel ionisation du Hg

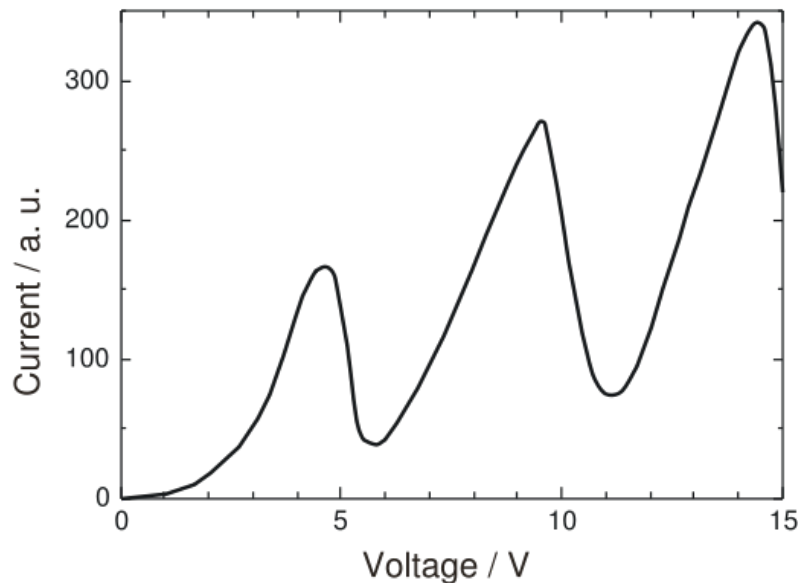
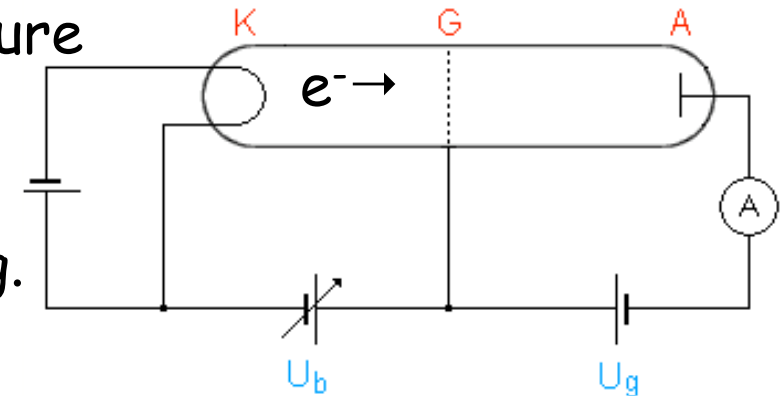
Dans tube: accélèrent e^- dans vapeur de mercure

⇒ e^- ont des chocs avec Hg:

Élastiques ou

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

Mesurent énergie e^- (cf Lenard).



Plusieurs fois même structure:

e^- : ↗ (élastique) jusqu'à 4,9V puis
↘ inélastique, e^- ont cédé 4,9V.

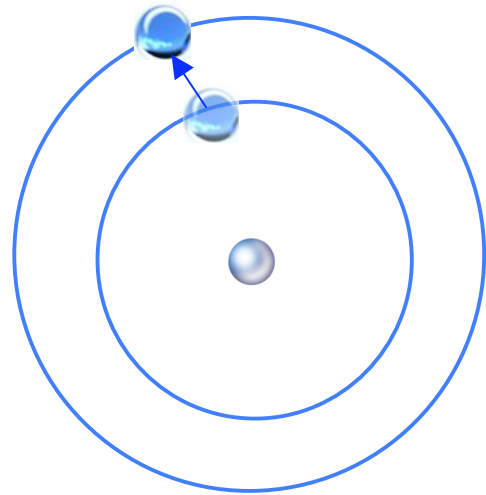
Donc: E ionisation = 4,9V

Ils publient...

C'est faux !

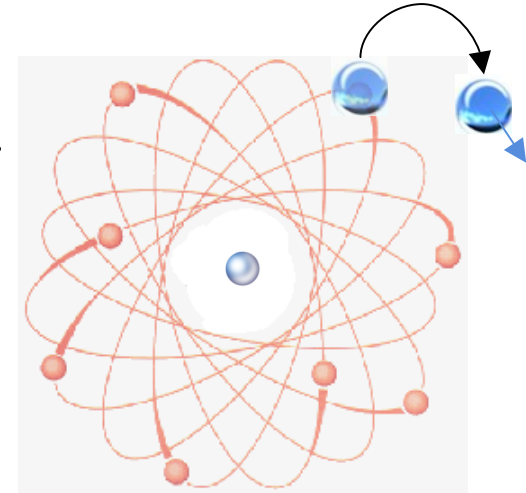
Pas ionisation mais excitation:

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



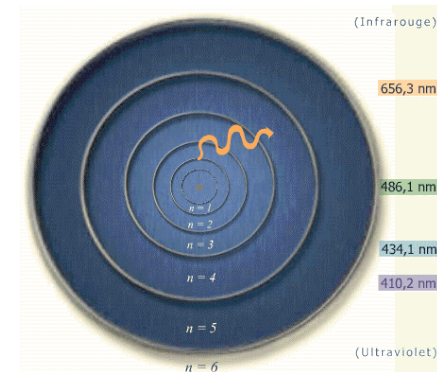
Ils n'ont pas mesuré l'énergie d'éjection d'un e^- dans atome version Rutherford \Rightarrow

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



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

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

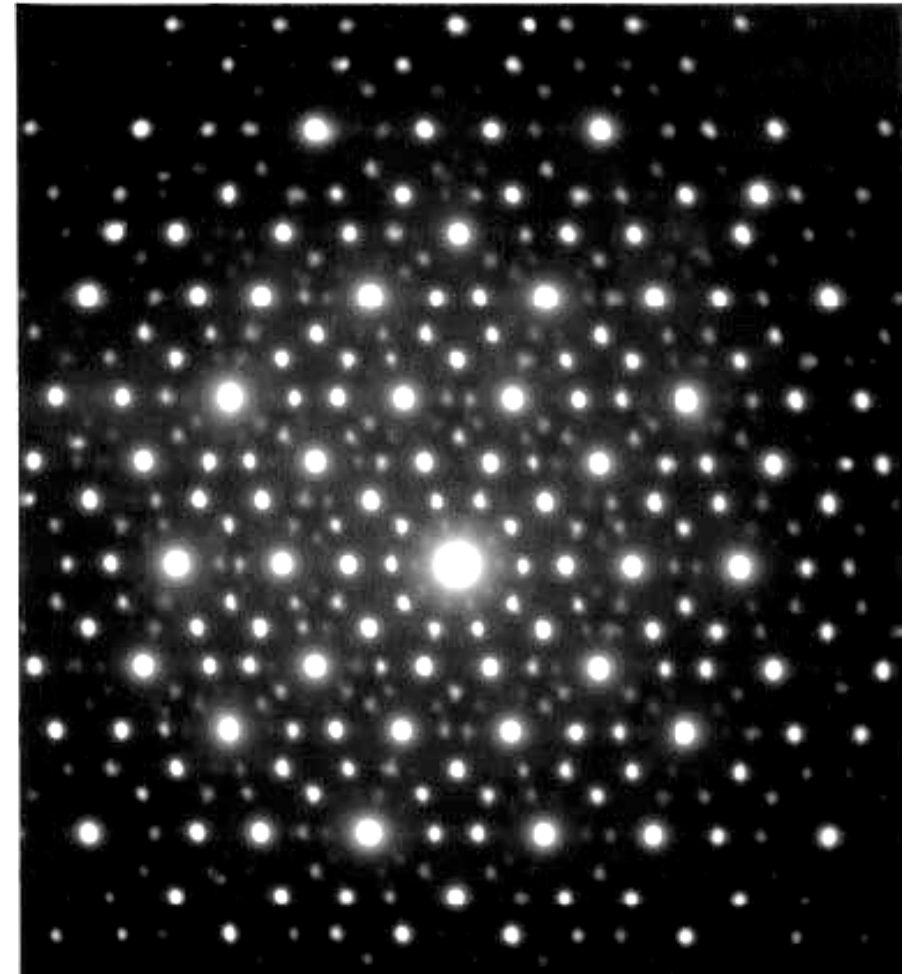
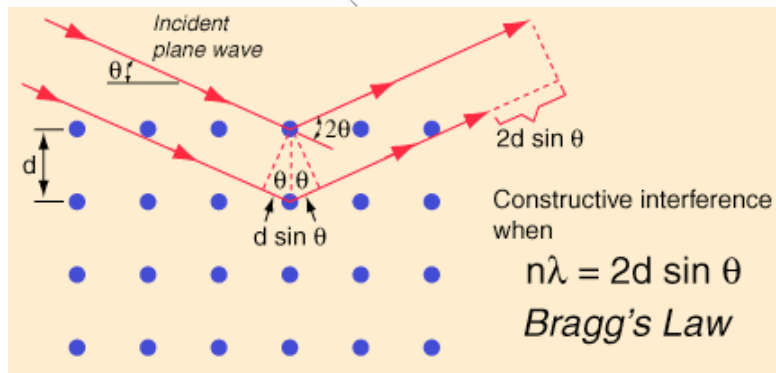
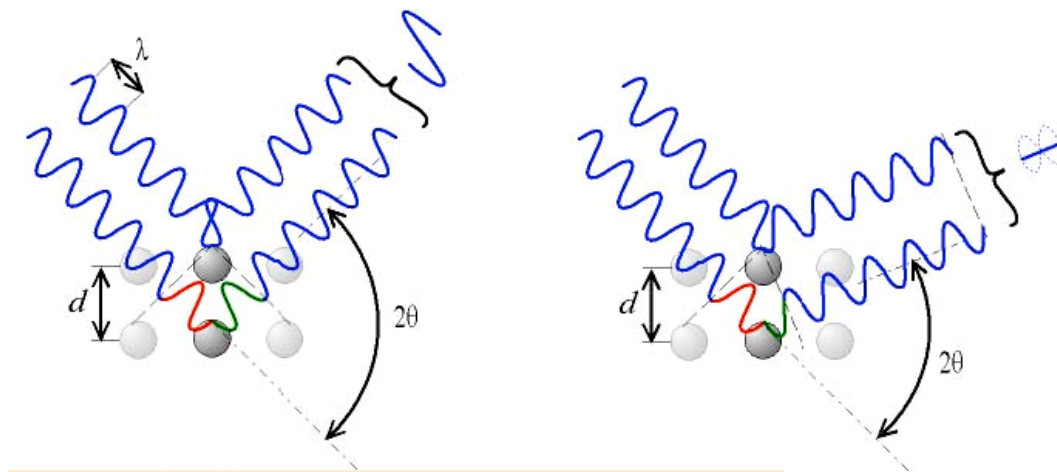


\Rightarrow Processus inverse de l'effet photo-électrique (photon $\rightarrow e^-$)
des désexcitations d' $e^- \rightarrow$ photons (du X au visible)
On a compris les raies discrètes étudiées par Kirchhoff...

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



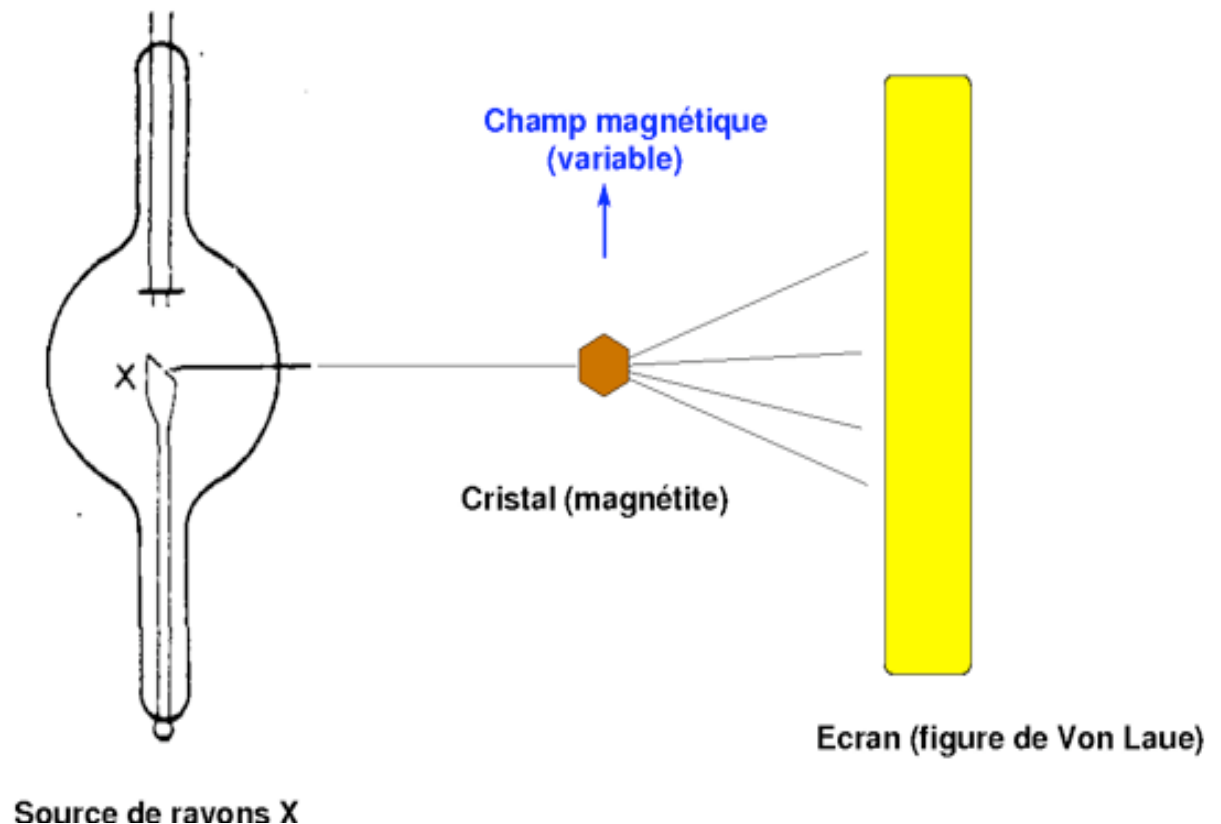
En 1916 :

- 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**

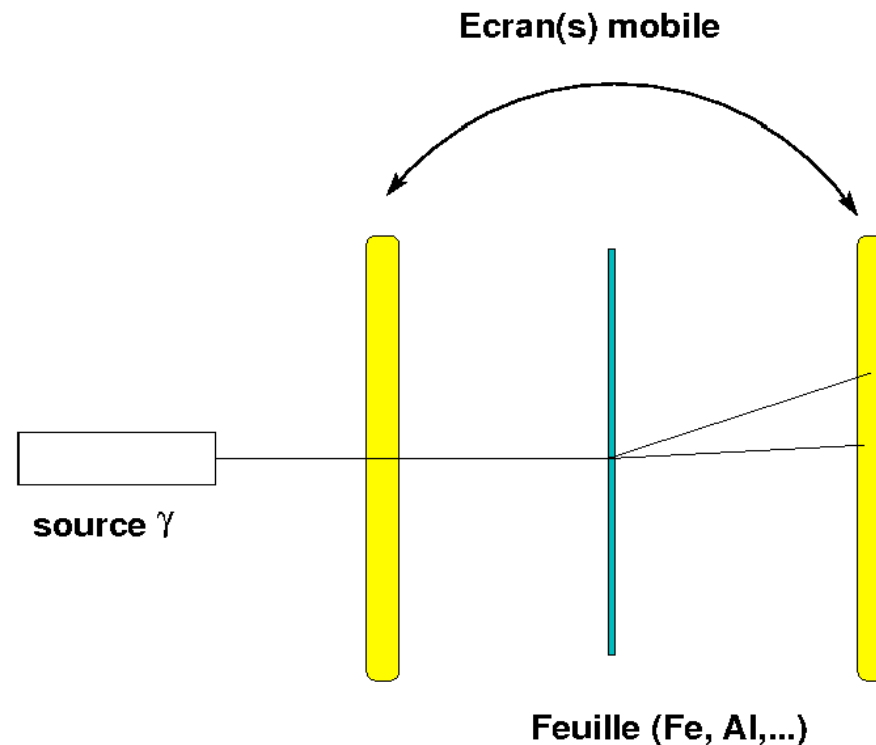


Effet Compton (2)

Série d'expériences pour comprendre la diffusion de X (et des γ)
1ère question : les rayons diffusés sont-ils identiques aux rayons incidents ?

Réponse: NON (Compton, Gray 1917) !

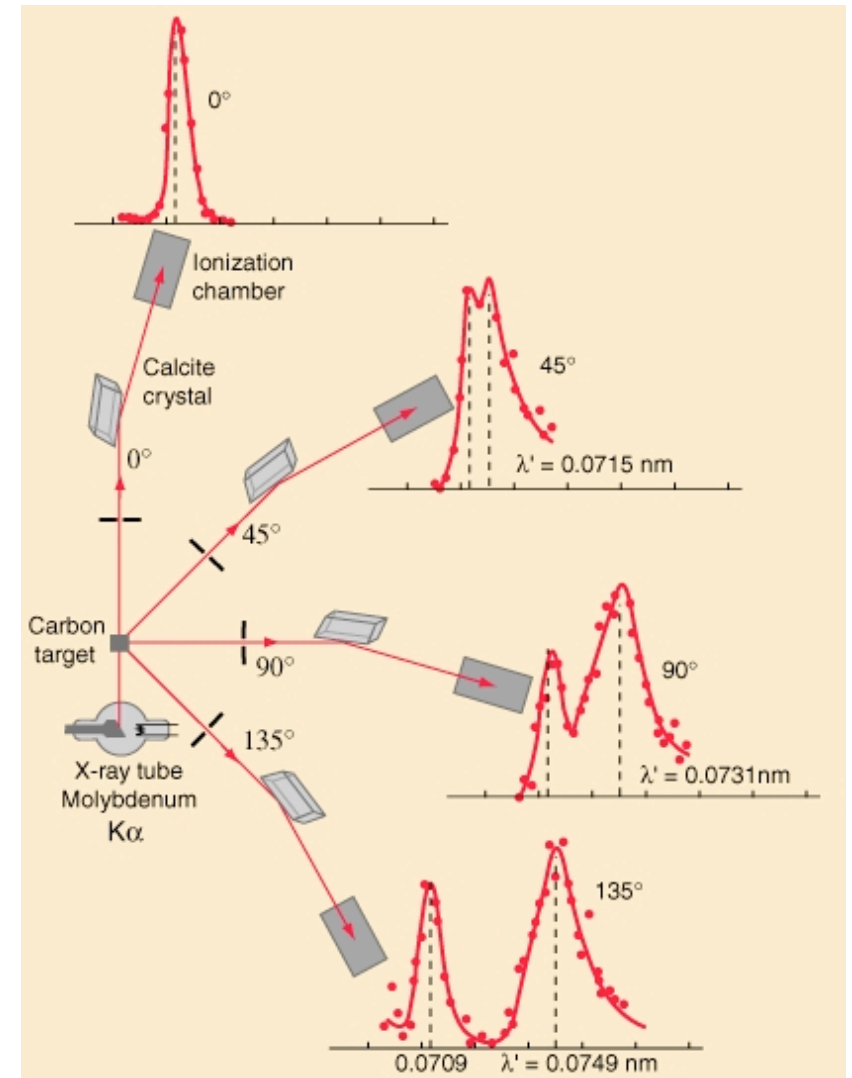
+ observation initiale (avec les gammas) : rayons diffusés + "mous"
d'autant plus que l'angle de déflexion est grand ...



Effet Compton (3)

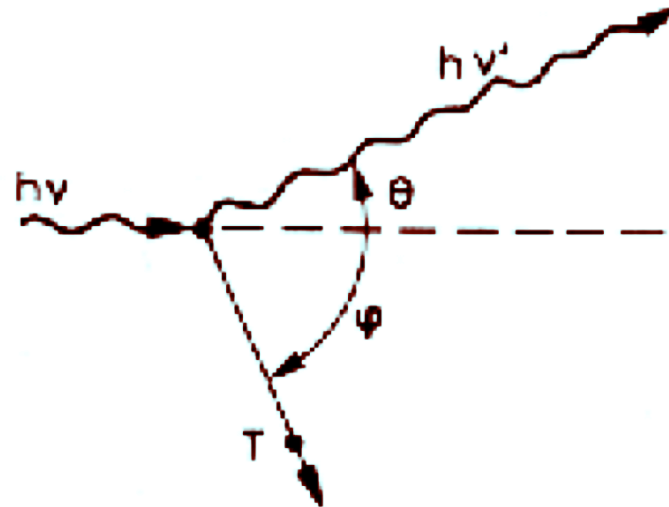
~1920 : est-ce qu'on voit la même chose pour les rayons X ?

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



Effet Compton (4)

Novembre 1922 : interprétation



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:

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

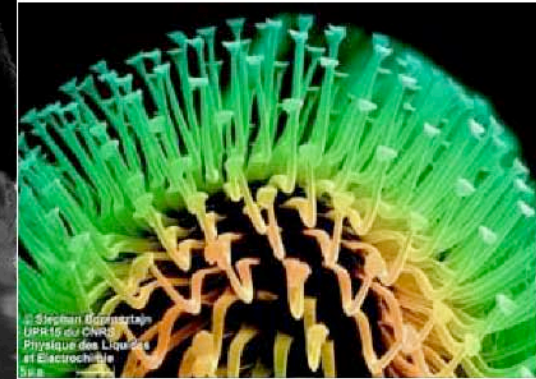
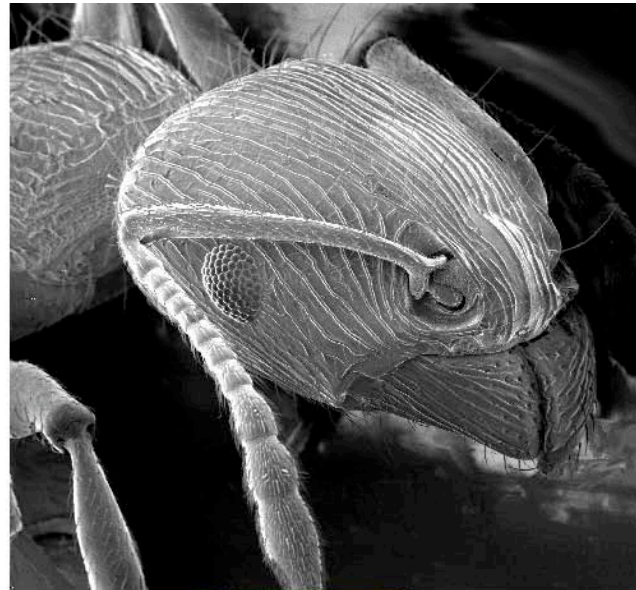
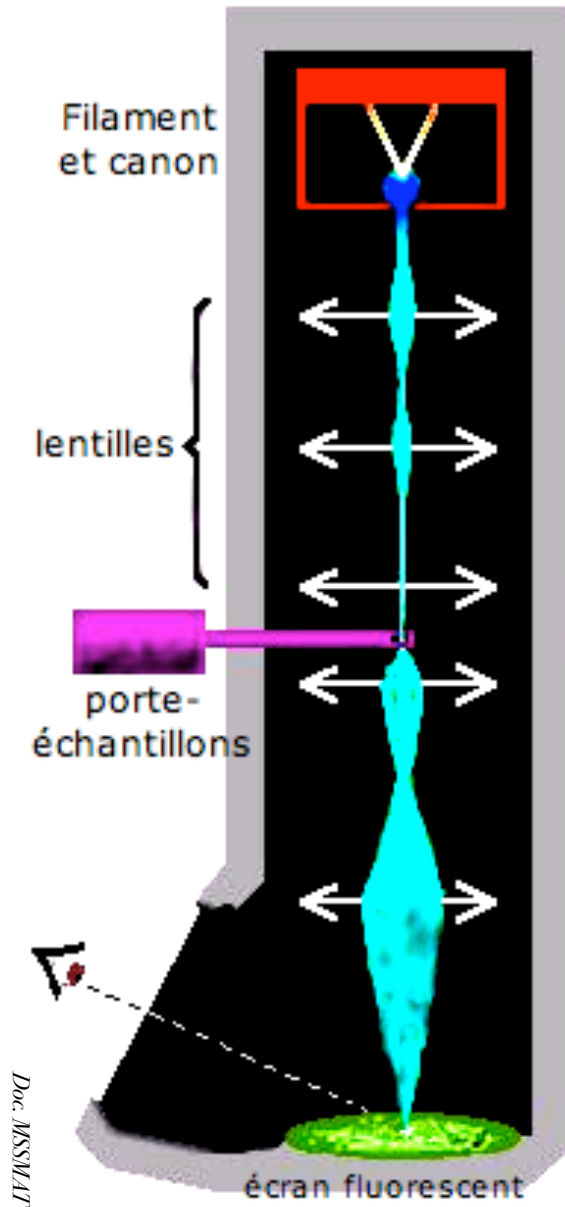
→ **petites échelles de distance** (physique 'microscopique')

Application microscopie électronique

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

Fin du déterminisme

Application: Microscope électronique



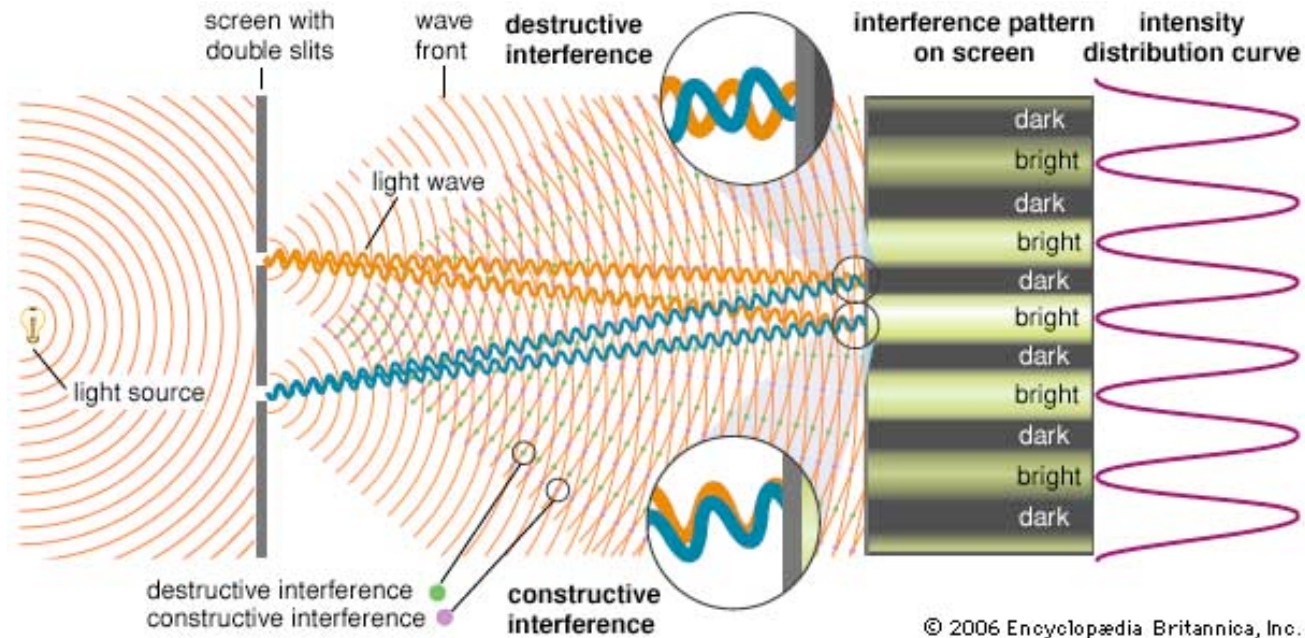
$\lambda \Rightarrow$ résolution

e.m. (visible) ~ 500 nm

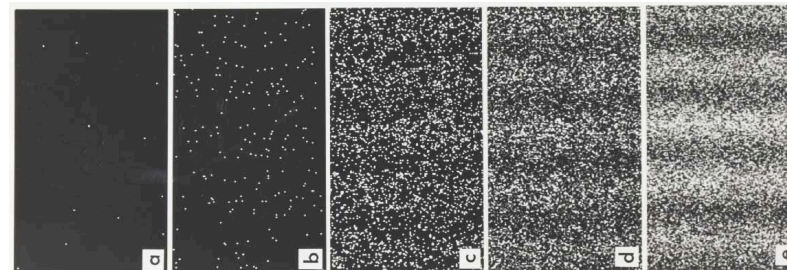
e (150 eV) ~ 0.1 nm

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



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)

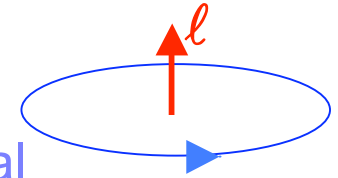
Et en plus la Relativité ($E=mc^2$) ouvre des possibilités ...
Pour s'y retrouver :

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

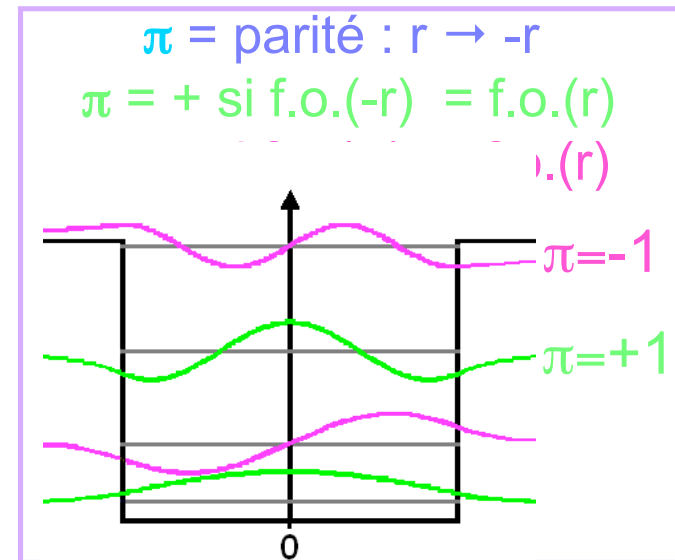
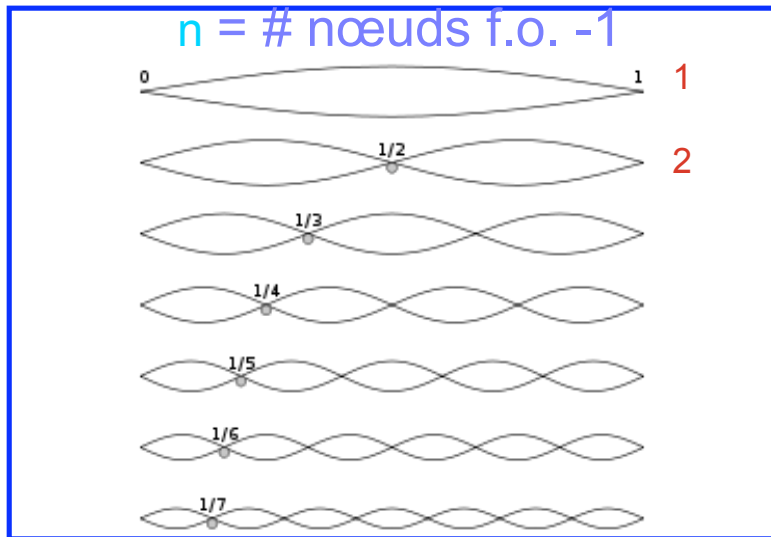
Exemples de nombres quantiques:

Associé à l'aspect corpusculaire:

l :
moment angulaire orbital



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



\neq
 \curvearrowright
 180°



$s = \frac{1}{2} \Rightarrow$ rotation de 2 fois 360°
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

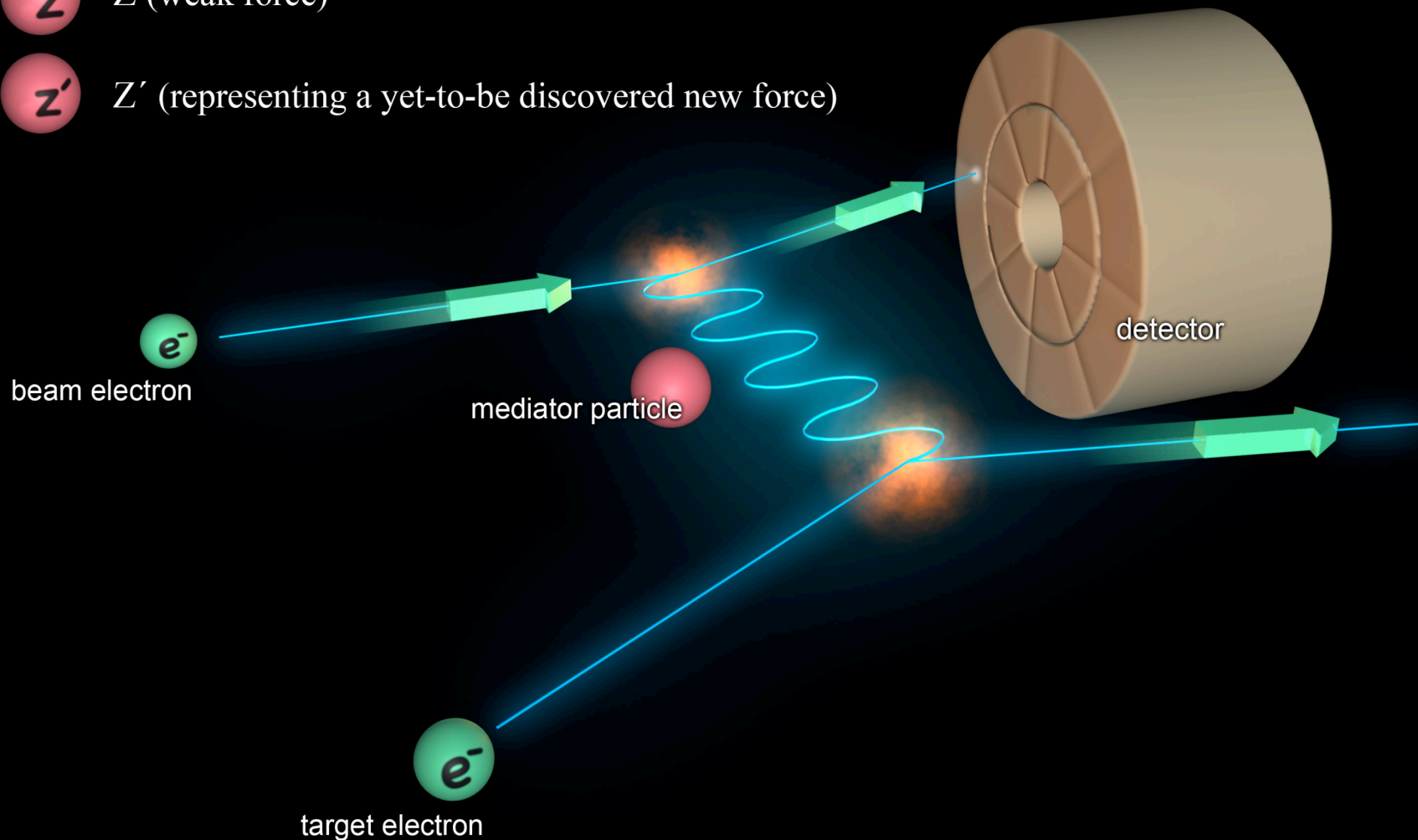
TYPE	FORCE RELATIVE	PARTICULES ÉCHANGÉES	EXEMPLE DE DOMAINE D'APPLICATION
FORTE	~ 1	gluons	noyau, nucléons
ÉLECTROMAGNÉTIQUE	$\sim 10^2$	photons	cortège électronique de l'atome, lumière, chimie
FAIBLE	$\sim 10^4$	bosons Z^0, W^+, W^-	radioactivité β énergie solaire
GRAVITATION	$\sim 10^{38}$	graviton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

T10

Un diagramme de Feynman

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

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

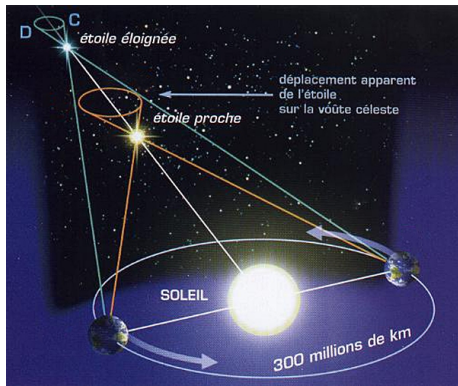


Le second nuage : questions autour de la lumière

- Très tôt une question : vitesse infinie ou pas ? cf débats autour de la réfraction (Newton : la lumière va + vite dans l'eau)
- mesures astronomiques (Rømer, **Bradley**) : grande vitesse, "voit" le mvt de la Terre
- mesure au sol (+ précises) : vitesse fct du milieu (maxi dans le "vide") - Fizeau, Foucault, Fresnel 1850-1870
- ⇒ **Questions du milieu de propagation ("ether") et du mvt de la Terre / celui-ci**
- **incompatibilité Galilée/Newton - Maxwell** :
 - ▶ interaction e.m. pas instantanée
 - ▶ eq. de Maxwell pas invariantes si transfo Galiléenne

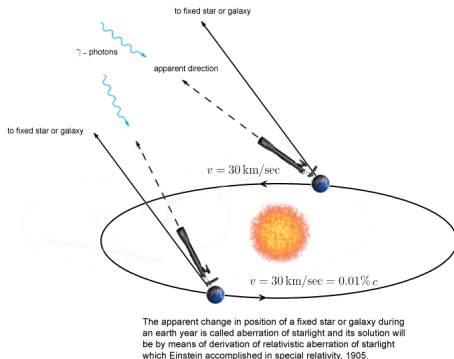
Bradley et la parallaxe (~ 1730)

- dès ~ 1650 on observe des déplacements apparents des étoiles "fixes"
- est-ce la parallaxe ? (permet de mesurer la distance)
- ~ 1720 Bradley étudie systématiquement ces déplacements
- ... ce n'est pas la parallaxe : \exists déplacement perpendiculaire à l'orbite de la Terre
- ~ 1730 ... longues et patientes mesures : \Rightarrow l'aberration
- \Rightarrow la lumière se déplace à (grande) vitesse finie ; la Terre aussi (dans le système solaire...)!
- une des 1eres mesure de la vitesse de la lumière (c)!
- \Rightarrow mvt "absolu" de la Terre / ether ("porteur" des ondes e.m.)?



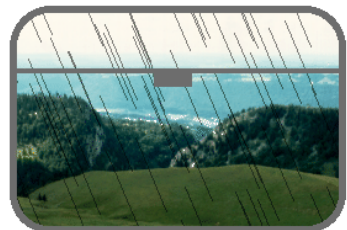
Bradley et la parallaxe (~ 1730)

- dès ~ 1650 on observe des déplacements apparents des étoiles "fixes"
- est-ce la parallaxe? (permet de mesurer la distance)
- ~ 1720 Bradley étudie systématiquement ces déplacements
- ... ce n'est pas la parallaxe : \exists déplacement perpendiculaire à l'orbite de la Terre
- ~ 1730 ... longues et patientes mesures : \Rightarrow l'aberration
- \Rightarrow la lumière se déplace à (grande) vitesse finie; la Terre aussi (dans le système solaire...)!
- une des 1eres mesure de la vitesse de la lumière (c)!
- \Rightarrow mvt "absolu" de la Terre / ether ("porteur" des ondes e.m.)?



Bradley et la parallaxe (~ 1730)

- dès ~ 1650 on observe des déplacements apparents des étoiles "fixes"
- est-ce la parallaxe ? (permet de mesurer la distance)
- ~ 1720 Bradley étudie systématiquement ces déplacements
- ... ce n'est pas la parallaxe : \exists déplacement perpendiculaire à l'orbite de la Terre
- ~ 1730 ... longues et patientes mesures : \Rightarrow l'aberration
- \Rightarrow la lumière se déplace à (grande) vitesse finie ; la Terre aussi (dans le système solaire...)!
- une des 1eres mesure de la vitesse de la lumière (c)!
- \Rightarrow mvt "absolu" de la Terre / ether ("porteur" des ondes e.m.)?



retour vers Maxwell

- une vitesse finie ?

Maxwell \Rightarrow la vitesse de la lumière (ds le vide ? ds l'ether ?)
apparaît comme un paramètre fondamental

\rightarrow interaction e.m. à vitesse finie (pas comme la gravitation)

- un milieu de propagation ?

Maxwell se (re)pose la question du mvt de la Terre / ether

\rightarrow envisage sa mesure en comparant les instants des éclipses de Io ds différentes configurations (/ ether)

correspond avec D. Todd (un astronome) à ce sujet (1879)

Discute sa mesure en labo dans une lettre publiée en hommage posthume (Nature) ...

... où il trouve que l'effet est trop petit pour ça : $\sim 10^{-15}$

retour vers Maxwell

- une vitesse finie?

Maxwell \Rightarrow la vitesse de la lumière (ds le vide? ds l'ether?)
apparaît comme un paramètre fondamental

\rightarrow interaction e.m. à vitesse finie (pas comme la gravitation)

- un milieu de propagation?

Maxwell se (re)pose la question du mvt de la Terre / ether

\rightarrow envisage sa mesure en comparant les instants des éclipses
de Io ds différentes configurations (/ ether)

correspond avec D. Todd (un astronome) à ce sujet (1879)

Discute sa mesure en labo dans une lettre publiée en hommage
posthume (Nature) ...

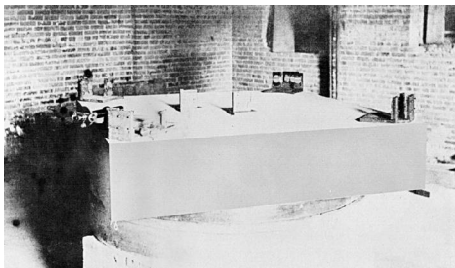
... où il trouve que l'effet est trop petit pour ça : $\sim 10^{-15}$

...et lue par Michelson



Experience(s) de Michelson

Utilise un interféromètre (inventé pour l'occasion) \Rightarrow gain en précision (donc très sensible à l'environnement)



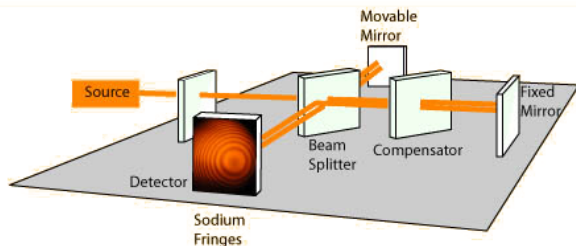
rapport des temps de vol attendu :

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Pas d'effet observé (malgré de nombreux perfectionnements)

Experience(s) de Michelson

Utilise un interféromètre (inventé pour l'occasion) \Rightarrow gain en précision (donc très sensible à l'environnement)

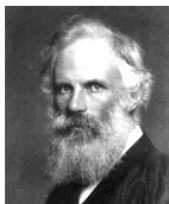


rapport des temps de vol attendu :

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Pas d'effet observé (malgré de nombreux perfectionnements)

FitzGerald, Lorentz : les 1ers pas



G. F. FitzGerald (1851-1901)
brilliant mathematical physicist



H. A. Lorentz (1853-1928)
Nobel Prize in Physics 1902

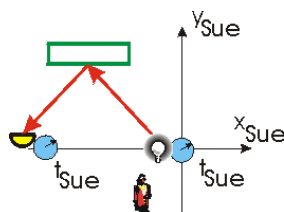
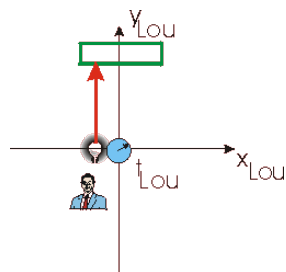
FitzGerald : on peut réconcilier $c = \text{cste}$ en changeant les distances
(facteur de "contraction" $1/\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$)

Lorentz : nécessité d'introduire aussi un "temps" local (fct de la position!?) pour conserver les eq. de Maxwell (temps qui change en fct du référentiel avec le même facteur)

Einstein (1905, et après)

- pose comme **principe** l'invariance des lois physiques / mvt a vitesse cste (et donc de la vitesse de la lum. et des eq. de Maxwell)
- examine les (multiples) conséquences de ce principe (**de relativité**) :
- plus de temps 'absolu' : temps = mesure physique
- outil de mesure = la lumière
- \Rightarrow temps et distance (espace) intimement liés (temps mesure avec lumière + étalon, espace avec lumière + horloge) \Rightarrow espace-temps
- et **relatifs** à l'observateur - pas de **simultanéité** absolue non plus!

Dilatation des temps

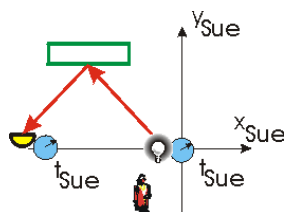
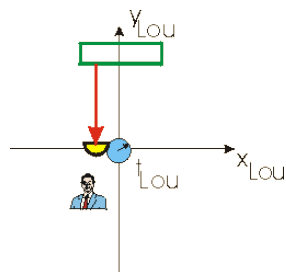


Sue est en mvt / Lou; tous les 2 mesurent le temps de trajet de la lumière
Pour Sue le trajet de la lumière est plus long \Rightarrow le temps écoulé est plus long (!)
 \Leftrightarrow "le temps de Lou va plus vite"

Ex.1 : les muons du rayonnement cosmique vivent plus "longtemps" dans notre référentiel que leur durée de vie propre $\sim 2.2\mu\text{s}$ - ils volent qq 10aines de km à une vitesse proche de c

Ex. 2 : Supernovæ lointaines

Dilatation des temps



Sue est en mvt / Lou; tous les 2 mesurent le temps de trajet de la lumière
Pour Sue le trajet de la lumière est plus long \Rightarrow le temps écoulé est plus long (!)
 \Leftrightarrow "le temps de Lou va plus vite"

Ex.1 : les muons du rayonnement cosmique vivent plus "longtemps" dans notre référentiel
que leur durée de vie propre $\sim 2.2\mu\text{s}$ - ils volent qq 10aines de km à une vitesse proche de c

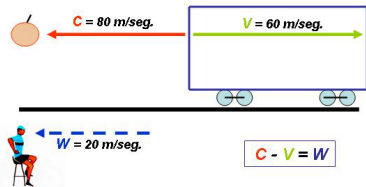
Ex. 2 : Supernovæ lointaines

Contraction des longueurs & composition des vitesses

- attachons nous à un muon formé dans la haute atmosphère (25km)
- Sa durée de vie est (pour nous) $2.2\mu\text{s}$
- Pendant ce temps nous avons atteint la Terre : elle était plus près que 25km! ? == contraction des longueurs :

$$L = L_0 \frac{1}{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

Composition des vitesses :

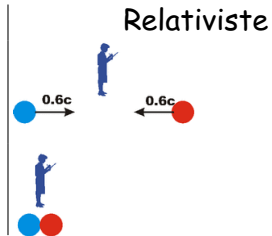
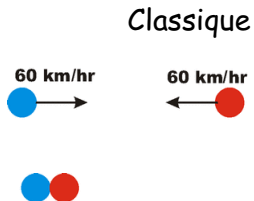


Pour le cas "relativiste" :

$$W = \frac{C - V}{1 - C \frac{V^2}{c^2}}$$

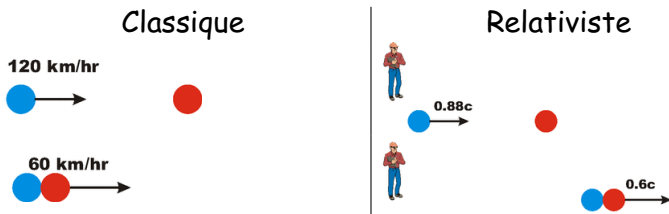
La pétanque relativiste

observateur au repos



La pétanque relativiste

observateur en mvt avec la boule rouge





Conservation de l'impulsion (mv) \Rightarrow masse **apparente** varie avec v

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

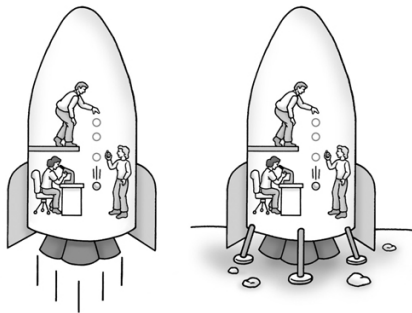
(m_0 == masse au repos)

Conséquences

- Dynamique newtonienne : m mesure l'inertie (= "résistance" à l'accélération)
- accélérer jusqu'à c ? $\Rightarrow m$ devient infinie / demande une énergie infinie
- énergie cinétique "classique" : $E_c = \frac{1}{2}m_0v^2$
 \rightarrow forme relativiste : $E_c = (m - m_0)c^2$ ( 1905)
- Extension ( 1907) : énergie **totale** : $E_{tot} = mc^2$
- ... il existe donc une énergie au repos : $E_0 = m_0c^2$
- Et c'est beaucoup : $E/m = c^2 \sim 9.0 \times 10^{16} \text{ J.kg}^{-1}$

Généralisation - AE (1907-1917)

Le point de départ d'Einstein



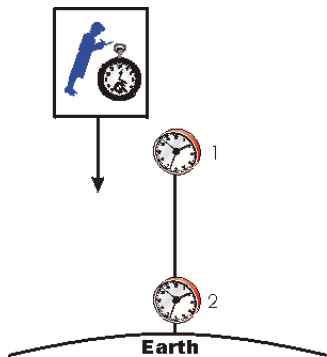
Les mêmes observations (lois physiques) dans les 2 cas?!

"masse" recouvre deux concepts :

- masse inertielle
- masse gravitationnelle

leur identité \approx principe d'équivalence

Conséquences (1)

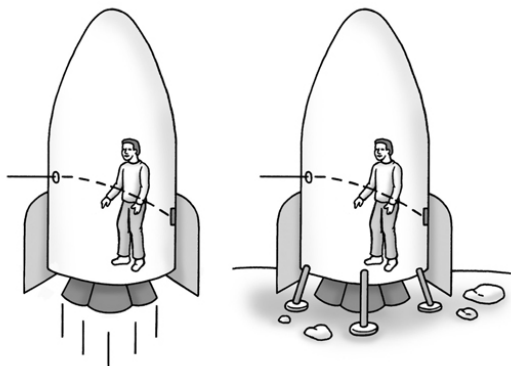


la vitesse de l'observateur (en chute libre) en face de la pendule du bas est + grande qu'en haut

⇒ retard + grand que celle du haut

⇒ La gravitation affecte le temps : dilatation gravitationnelle (vérifié en labo, dans vos GPS ...)

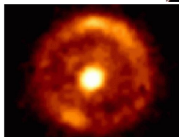
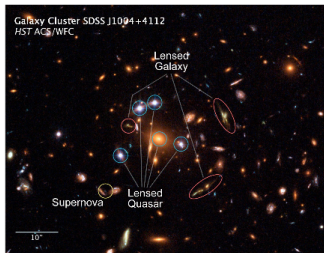
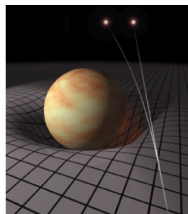
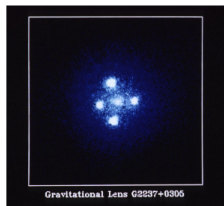
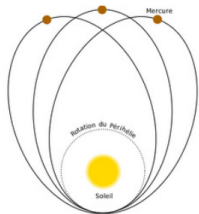
Conséquences (2)



⇒ si le rayonnement e.m. a une énergie il a une masse ⇒ sensible au champ de gravitation!

Mais "la lumière se propage dans le vide en ligne droite" ⇒ lien profond entre géométrie et gravitation (ou dynamique)

De nombreuses vérifications



Conclusions

- après le 1er nuage :
 - ▶ 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)
- après le 2d nuage :
 - ▶ Plus de temps ni d'espace absolus - tout est relatif
 - ▶ Equivalence masse - énergie $E = mc^2$
 - ▶ Notions de temps et masse propres important surtout à haute vitesse / énergie (physique subatomique, astrophysique)
- mais des problèmes restent : mélange des mondes quantique et relat.? (gravitation non quantifiée) ... un nouvel orage?