

Chapitre 4

Onde et matière

23-24



Plan:

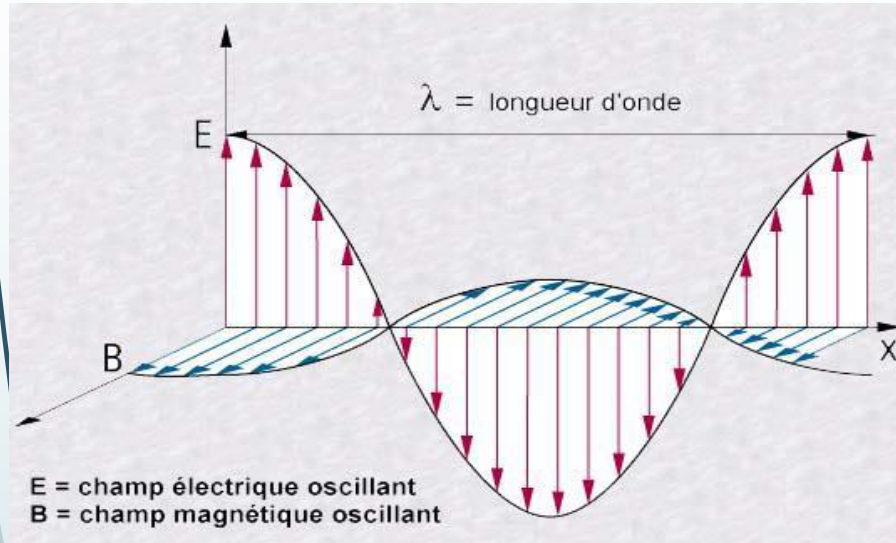
I. Introduction

II. Échec de la physique classique:

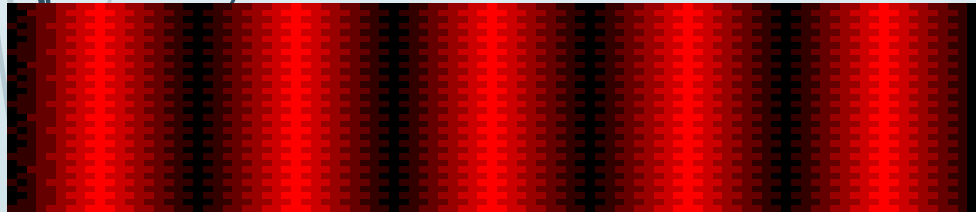
- 1- Spectres des atomes (spectres discrets)**
- 2- Corps Noir**
- 3- Effet Photoélectrique**
- 4- Effet Compton**
- 5- Dualité onde-particule**
- 6- Photon**

I. Introduction

Propriétés de la lumière (photons) :



A la fin du XIX^e siècle, James Maxwell définit la lumière comme étant un faisceau d'ondes électromagnétiques (OEM) se déplaçant à vitesse constante dans le vide: la fameuse célérité $c = 3 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$. Il définit une OEM comme étant une oscillation de champs électrique (E) et magnétique (B) associés.

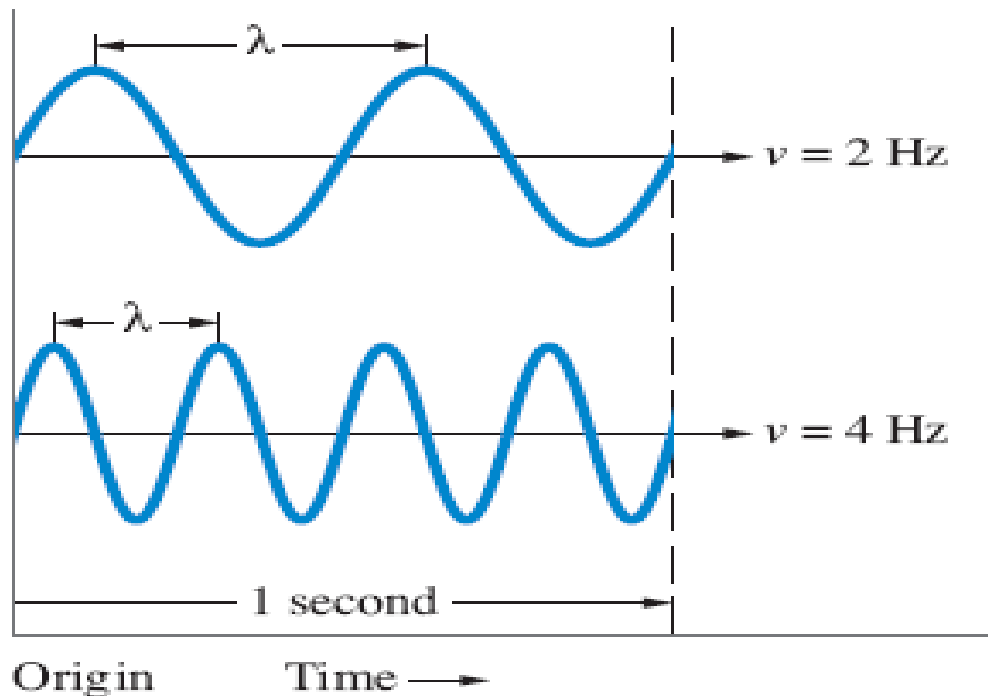


La lumière se comporte comme une onde. L'aspect ondulatoire a été observé dans l'expérience des franges d'interférence Young.

- La lumière est définie par sa **fréquence ν** (encore notée **f**) ou par sa **longueur d'onde λ** . ν et λ sont reliées par la relation : $\nu = \frac{c}{\lambda}$
- La fréquence de la lumière détermine l'énergie des photons : **$E = h \nu$**

Propriétés de la lumière (photons) :

- λ est la distance parcourue par l'onde pendant une période.
- La fréquence, f ou ν , est le nombre de longueurs d'onde qui traversent un point fixe pendant une seconde. Unité: s^{-1} , ou Hertz (Hz).



$$\nu = \frac{c}{\lambda}$$

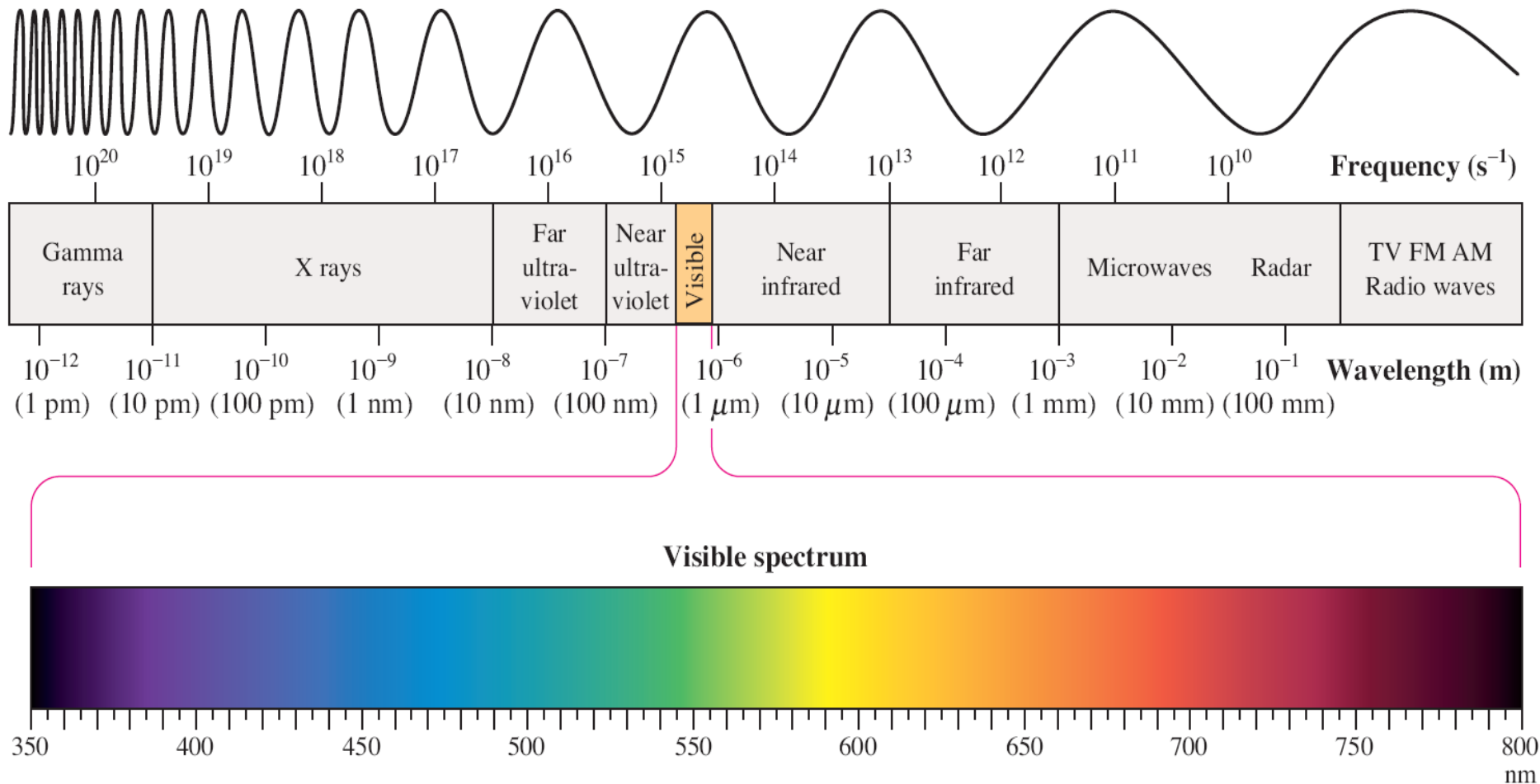
$$c = 3 \times 10^8 \text{ m / s.}$$

quand

$$\lambda / 2 \quad \rightarrow \quad \nu \times 2$$

Spectre électromagnétique

La gamme de fréquences et de longueurs d'onde du rayonnement électromagnétique est appelée spectre électromagnétique.



Quantification de l'énergie par Planck (1900)

- Selon Max Planck, les atomes d'un solide oscillent avec une fréquence définie, ν ou f .
- Il a proposé qu'un atome ne puisse avoir que certaines énergies vibratoires, ΔE , celles autorisées par la formule,

$$\Delta E = h\nu$$

où h est la constante Planck et vaut $h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J.s}$

$h\nu$ est le **quantum d'énergie**, c'est la plus petite quantité d'énergie échangeable

II. Échec de la physique classique

- ➔ Spectres des atomes (spectres discrets)**
- ➔ Corps Noir**
- ➔ Effet Photoélectrique**
- ➔ Effet Compton**

1- Spectres des atomes (spectres discrets)

Selon la mécanique classique, le spectre des éléments doit être continu.

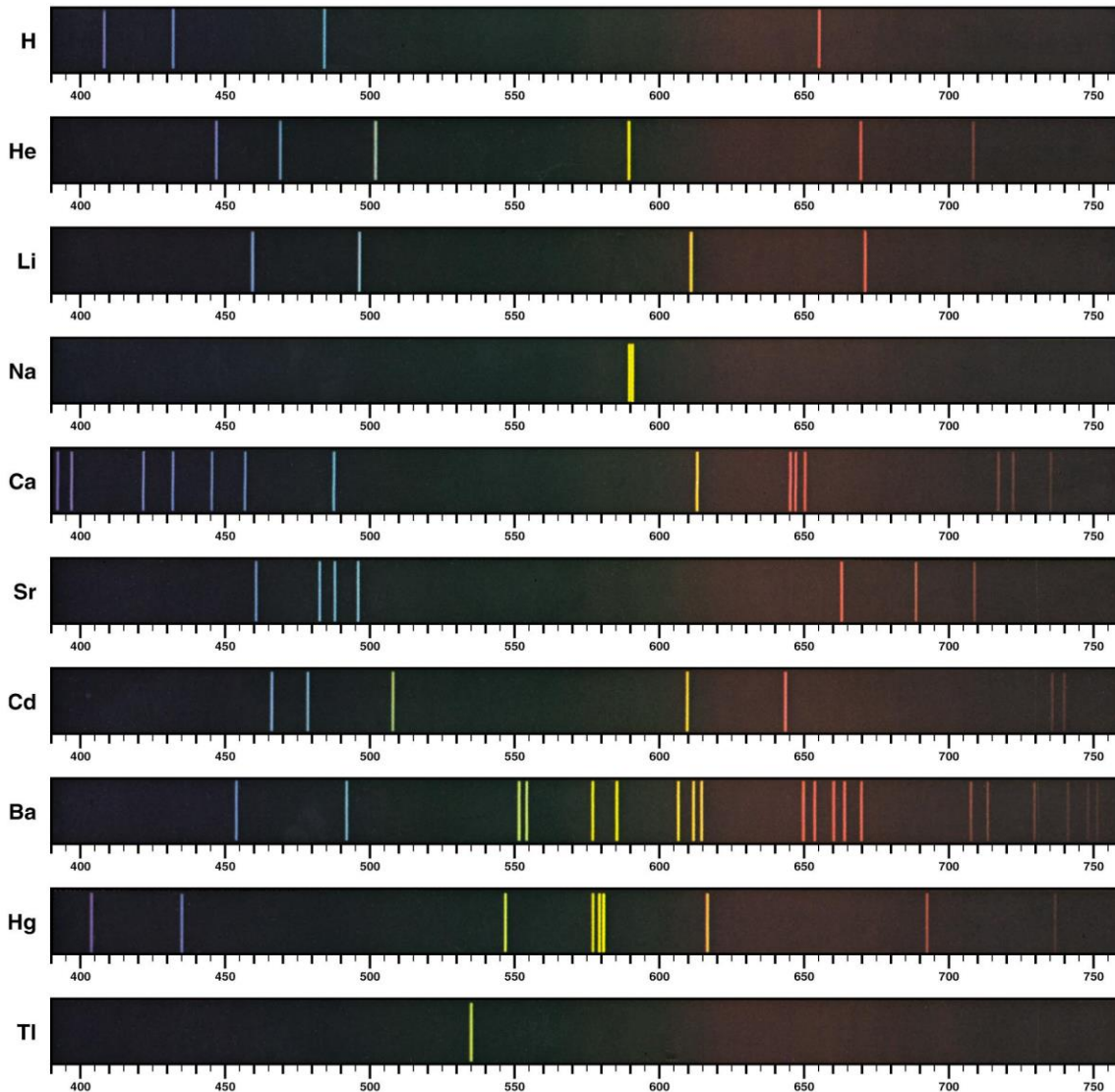
Mais c'est discret! Car les niveaux d'énergies sont quantifiés. Par exemple pour l'atome d'hydrogene (H) on a :

$$E_n = \frac{-13.6}{n^2} (eV)$$

Avec n entier naturel différent de 0



EMISSION (LINE) SPECTRA



2- Corps noir



Un solide chauffé à une température donnée émet un rayonnement appelé rayonnement thermique

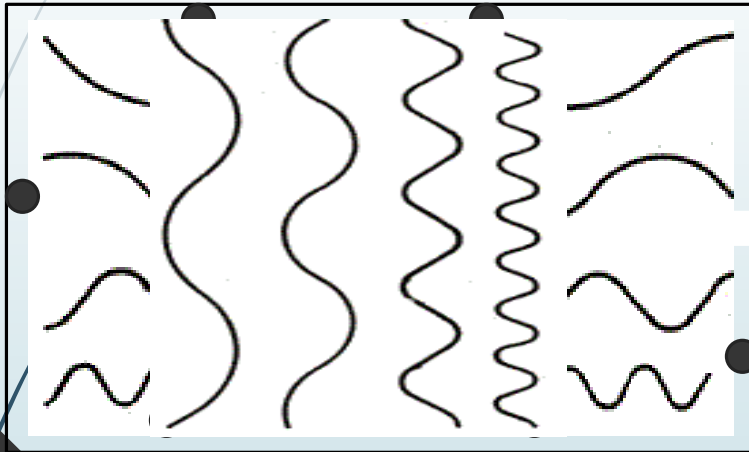
Ce rayonnement à une distribution spectrale continue.

Tout corps émet et absorbe simultanément du rayonnement. Lorsque la température du corps est constante, il est à équilibre thermique (énergie émise = énergie adsorbée) avec son entourage et devient un excellent émetteur de rayonnement

Définition corps noir: un **corps noir** est un objet idéal totalement absorbant à toute radiation électromagnétique et dont le **spectre électromagnétique ne dépend que de sa température.**

Représentation d'un corps noir : le corps noir peut être assimilé à une cavité percée d'un petit trou, de façon que le rayonnement qui pénètre est réfléchi et absorbé par les parois, seule une petite fraction des rayons sont réémis à l'extérieur

(T)

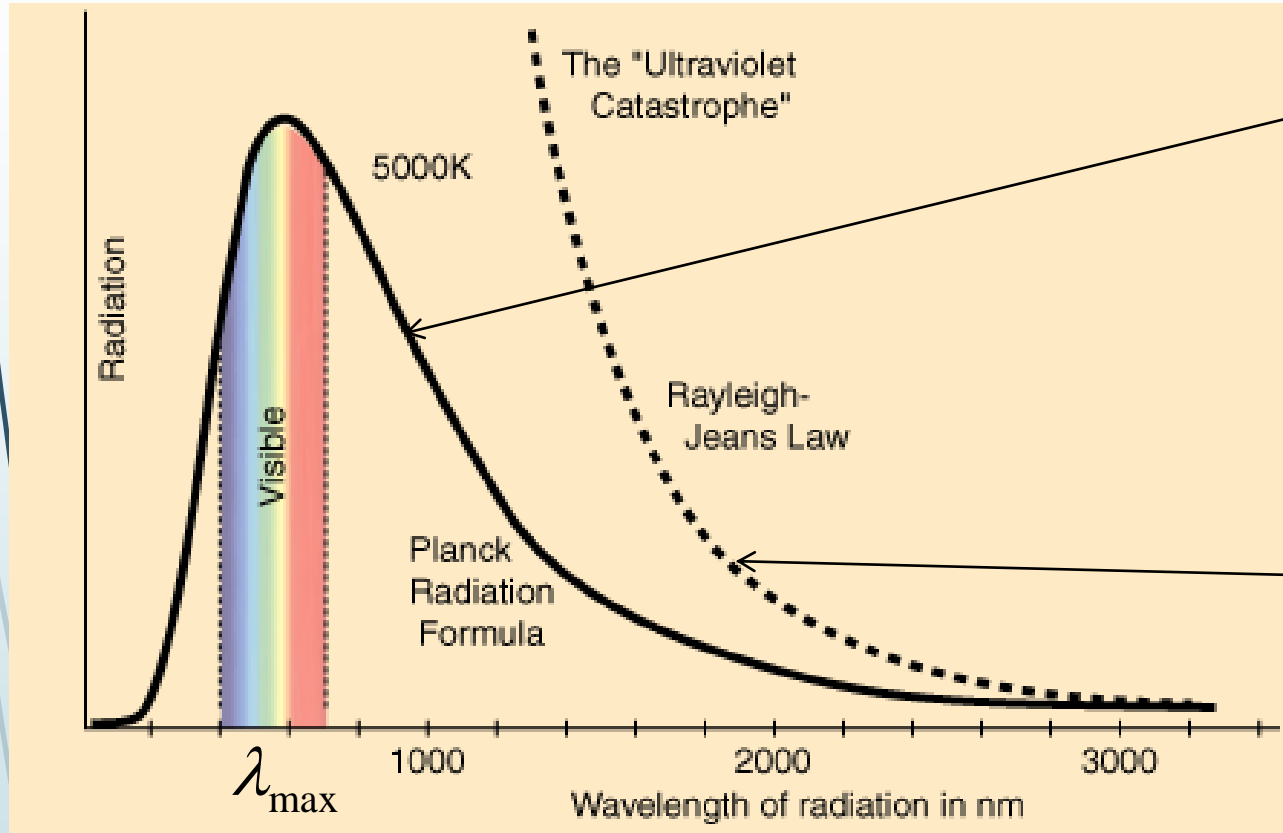


rayonnement
électromagnétique
émis par le corps
noir



Cette expérience avait été faite par Stephan (1879)

Rayonnement du corps noir : catastrophe de l'UV



Données expérimentales :
expliquées par la
mécanique
quantique

Courbe théorique
obtenue grâce à
la formule de
Rayleigh-Jeans :
mécanique
Classique

Distribution spectrale de rayonnement émis par un corps noir.

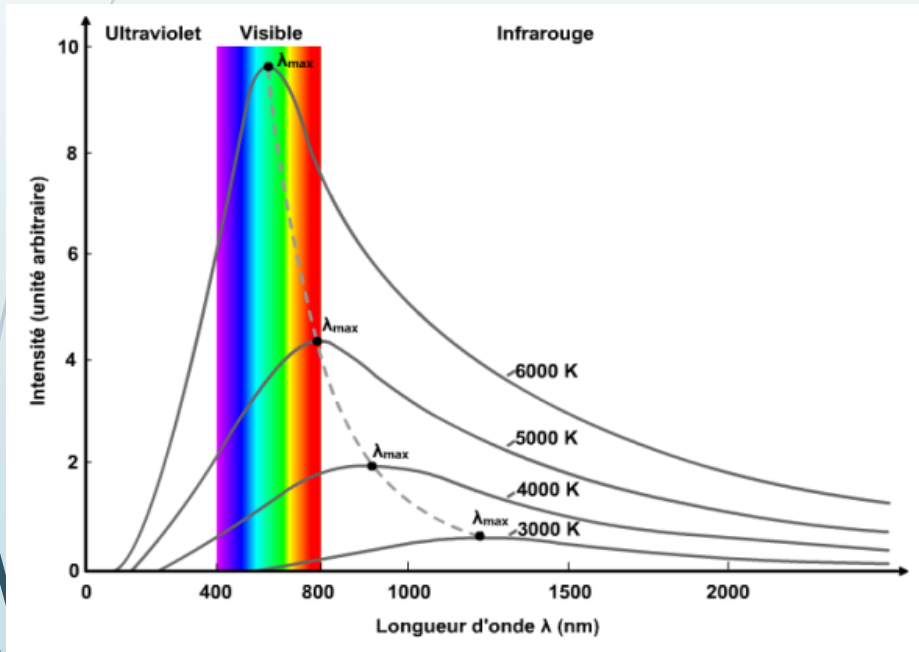
Observation : la courbe théorique (mécanique classique) s'approche des données expérimentales aux longueurs d'ondes élevées, mais se trouve en désaccord profond aux courtes longueurs d'onde : **c'est la catastrophe de l'UV**

Rayonnement du corps noir : loi de Planck

La **loi de Planck** décrit la distribution spectrale d'énergie W rayonnée en fonction de la température T du corps noir. Selon la loi de Planck, à une température T donnée, l'énergie W passe par un maximum W_{\max} pour une longueur d'onde λ_{\max} :

$$W(\lambda, T) = \frac{8\pi hc}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda k_B T}} - 1}$$

loi de Planck



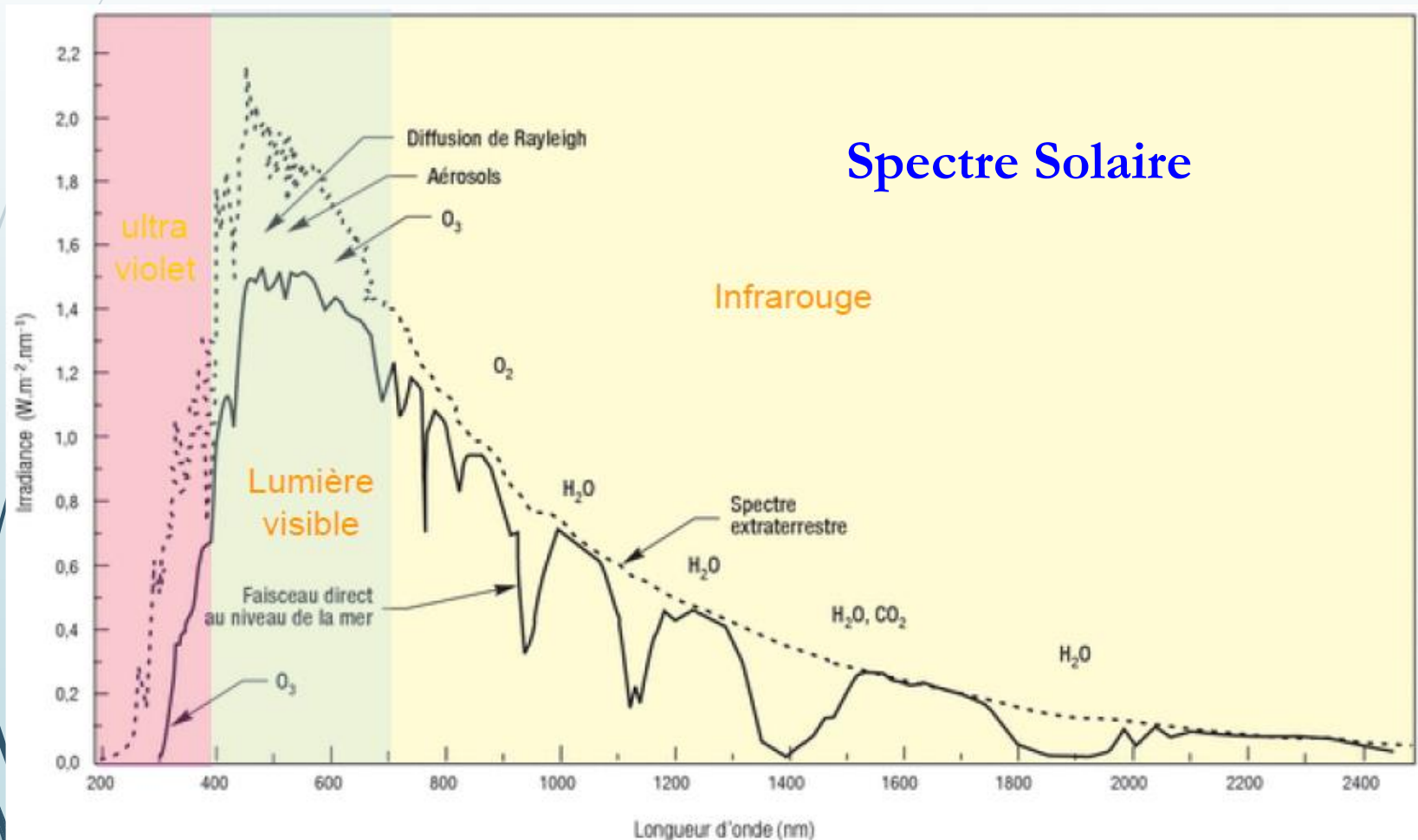
La distribution spectrale de rayonnement émis par des corps noirs à plusieurs températures

Il faut noter deux observations importantes :

- **Le maximum de la distribution se décale vers les courtes longueurs d'onde quand la température augmente.**
- **La puissance rayonnée totale augmente quand la température augmente.**

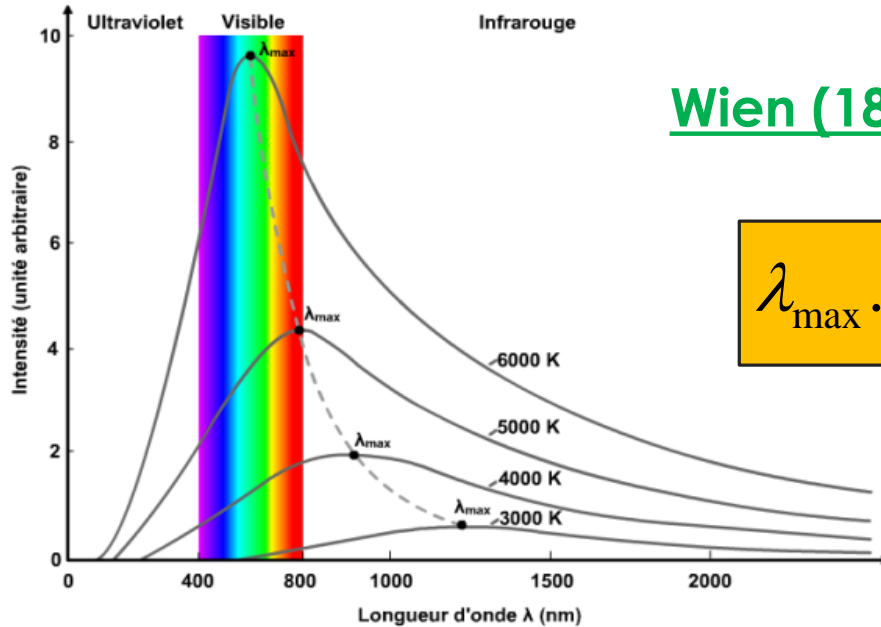
Exemple de corps noir : le soleil

Une étoile, le soleil par exemple est présenté comme un corps noir. A basse résolution spectrale, le spectre du soleil se superpose à celui d'un corps noir de température 5000 K environ.



Première observation : loi du déplacement de Wien

Wien (1894): Loi du déplacement de Wien



$$\lambda_{\text{max}} \cdot T = \text{cte} = 2.898 \times 10^{-3} \text{ m.K}$$

$$\lambda_{\text{max}} (m) \quad \text{et} \quad T(K)$$

Le spectre associé au rayonnement montre que l'intensité est maximale ou la densité spectrale d'énergie est maximale pour une longueur d'onde particulière λ_{max}

λ_{max} est la longueur d'onde du pic de la distribution spectrale à une température donnée. On peut voir sur la figure ci-dessus que la position de λ_{max} varie avec la température, comme indiqué dans l'équation de Wien. **C'est cette loi qui exprime un changement de couleur d'un objet à mesure qu'il est chauffé.**

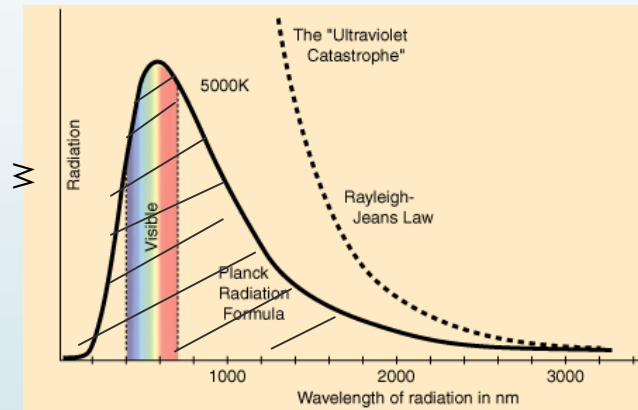
Deuxième observation : loi de Stephan

L'intensité totale du rayonnement est la puissance totale émise à toute les longueurs d'ondes par unité de surface

$$I = \frac{P}{S}$$

I en W/m^2

Cette intensité représente l'aire délimitée par la courbe et l'axe des abscisse



$$I = \int_0^{\infty} W(\lambda, T) d\lambda$$

Loi de Stephan (1879) :

$$I = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4$$

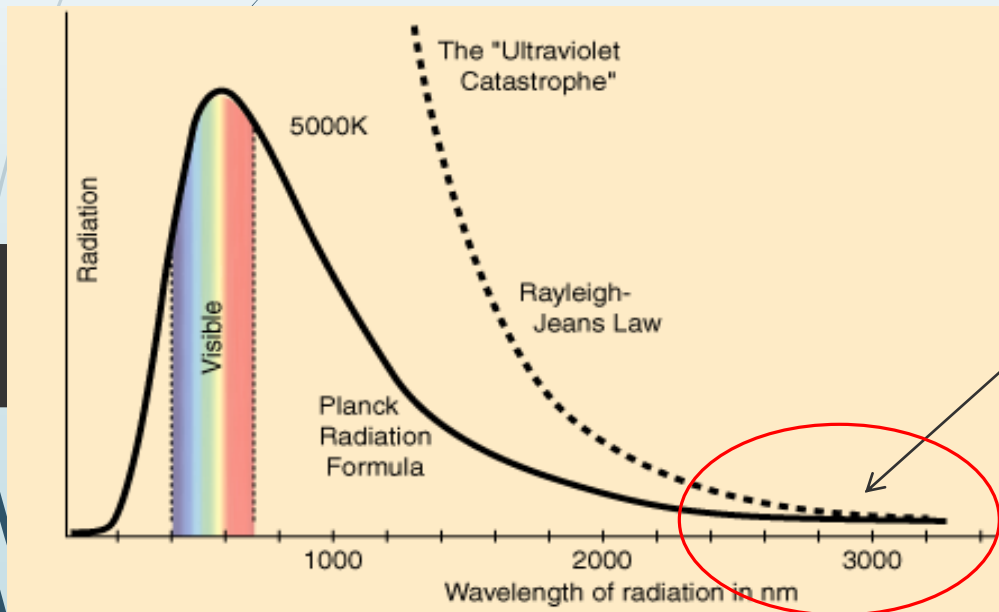
ε est l'émissivité. **Pour un corps noir idéal $\varepsilon = 1$.** L'émissivité est simplement le rapport entre le pouvoir émissif d'un objet et celui du corps noir idéal. **$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ J.m}^{-2}.\text{s}^{-1}.\text{K}^{-4}$ est la constante de Stefan-Boltzmann**

Interprétation classique:

Les particules d'un corps peuvent être assimilées à des oscillateurs électriques ayant des fréquences et des phases aléatoires.



Alors les particules vont émettre un rayonnement électromagnétique à toutes les fréquences avec des phases aléatoires.

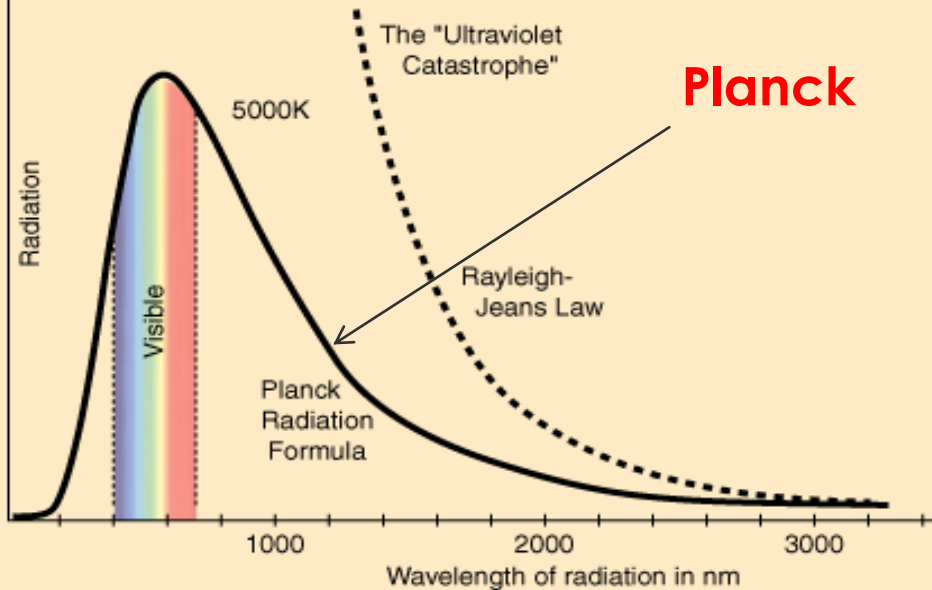


grande longueur
d'onde

Le modèle de Rayleigh (modèle classique) s'approche des données expérimentales aux λ élevées

Interprétation quantique de Planck (1900):

Planck a considéré que les parois de la cavité se comporte comme des **petits oscillateurs harmoniques qui ne peuvent osciller qu'avec une énergie représentant un multiple entier de la quantité $h\nu$** où ν est la fréquence de rayonnement émise ou adsorbée par les oscillateurs lorsqu'ils interagissent avec le rayonnement emprisonné dans la cavité



L'énergie des oscillateurs est donc quantifiée, elle ne peut prendre que des valeurs discrètes :

$$E = nh\nu$$

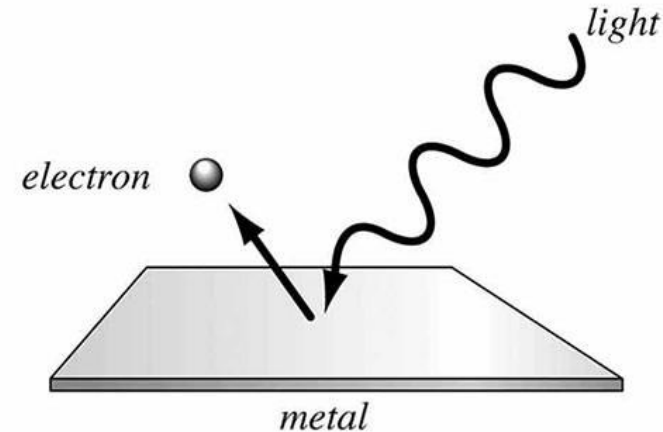
avec n entier naturel

Les oscillateurs peuvent absorber ou émettre de l'énergie par unité discrète multiple du quantum d'énergie fondamentale $h\nu$

3 - Effet Photoélectrique

L'éjection de l'électron d'une surface métallique par l'action de la lumière ou (rayonnement électromagnétique) est appelée effet photoélectrique.

Il a été découvert par Heinrich Hertz en 1887, alors qu'il tentait de confirmer l'existence d'ondes électromagnétiques comme le prédit la théorie de Maxwell en 1884.



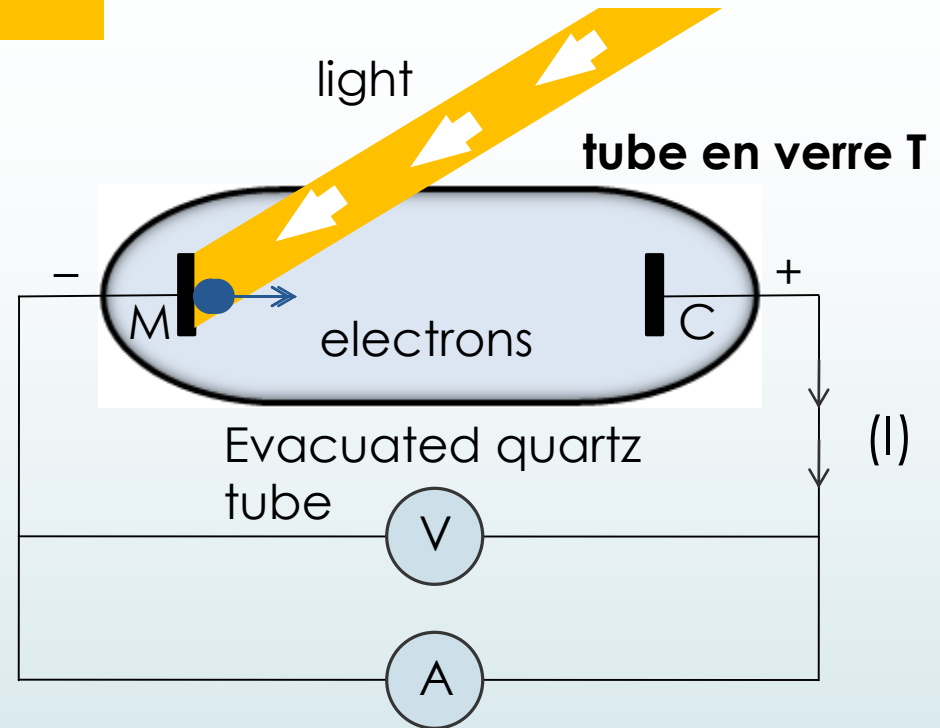
Ce même effet a ensuite été utilisé par Einstein en 1905 pour contredire de nombreux aspects de la théorie électromagnétique classique.

Une étude complète de l'effet photoélectrique a été réalisée par R. A. Milikan.

3 - Effet Photoélectrique

La cellule photoélectrique se compose d'un tube à vide en verre T dans lequel sont placés une plaque métallique M et une plaque collectrice de charges C.

Lorsqu'un faisceau monochromatique frappe la plaque M (la photocathode), cette lumière arrache des électrons qui sont émis dans tous les directions.

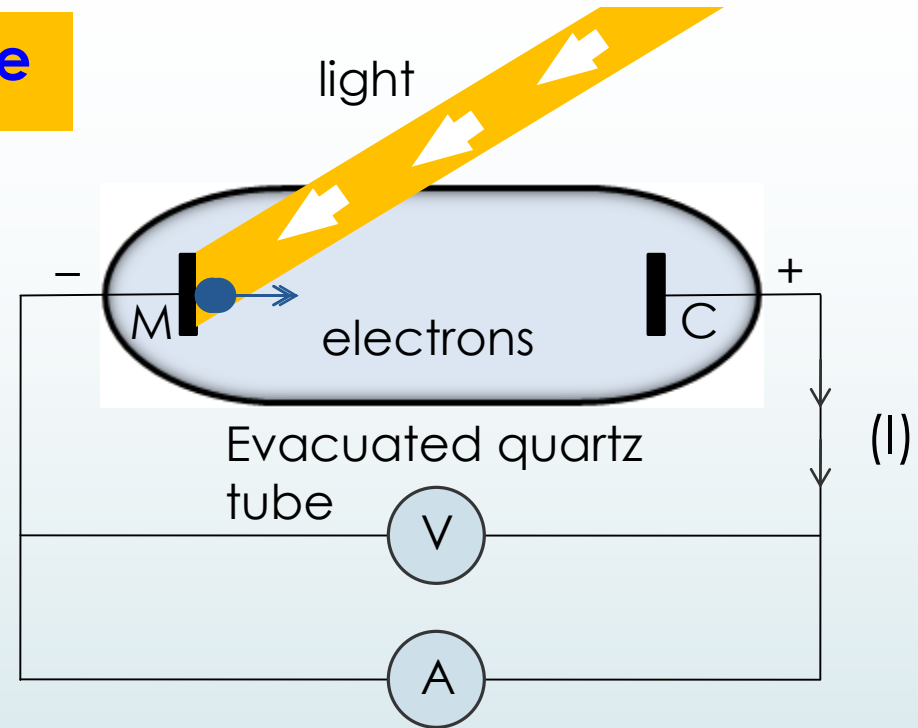


Entre la cathode et l'anode on applique une différence de potentiel noté V .

Le collecteur C avec un potentiel positif collectera les électrons. Le déplacement de électrons produit un courant I dans le circuit.

3 - Effet Photoélectrique

Seuls les électrons dont l'énergie cinétique est supérieure à eV pourront atteindre le collecteur C et produire un courant.



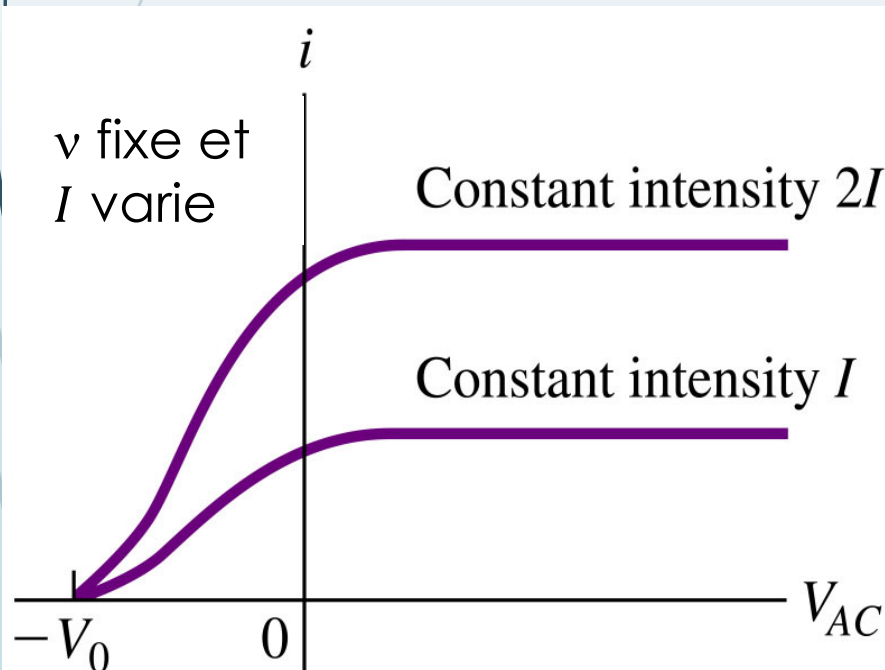
Le potentiel pour lequel aucun électrons n'atteint la plaque C ($I = 0$) est appelé **potentiel d'arrêt** $|V_0|$. On définit ainsi le **potentiel d'arrêt** comme étant la valeur en dessous de laquelle on n'observe pas l'*effet photoélectrique*

La relation entre l'énergie cinétique maximale E_{\max} de l'électron et le potentiel d'arrêt V_0 est :

$$E_{\max} = \frac{1}{2}mv_{\max}^2 = e|V_0|$$

Résultat de l'expérience

1- On règle V de façon à ce que le potentiel du collecteur soit légèrement négative par rapport à celui de l'émetteur, cette tension ralentit les électrons, ensuite on fait varier cette tension jusqu'à une valeur encore plus négative appelé potentiel d'arrêt : $-V_0$



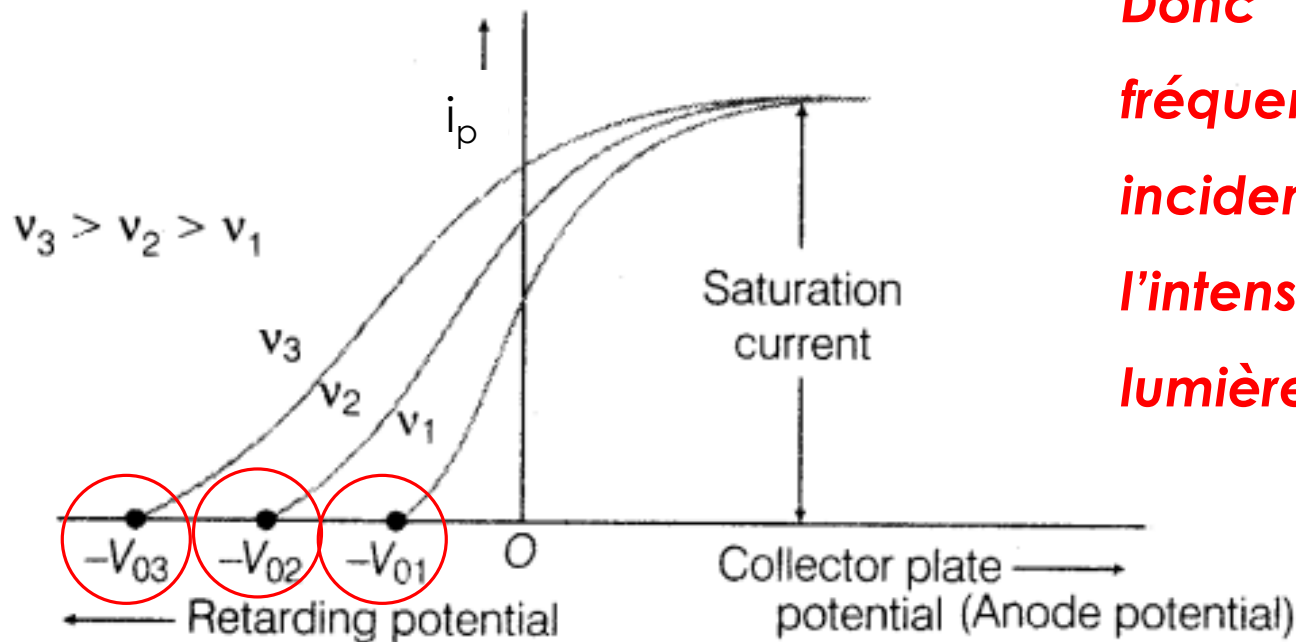
L'énergie cinétique maximale, E_{\max} , des photoélectrons est indépendante de l'intensité du rayonnement incident.

- Pas de courant pour $V < -V_0$
- $I = \text{cte}$ pour $V = 0$ ou $V > 0$ ceci signifie qu'il n'y a pas de perte de photoélectrons en chemin entre cathode et anode

3 - Effet Photoélectrique

2 - E_{\max} des photoélectrons dépend de la fréquence de la lumière incidente (ν). Pour différents fréquences, il faut appliquer des potentiels d'arrêt différents pour arrêter les électrons.

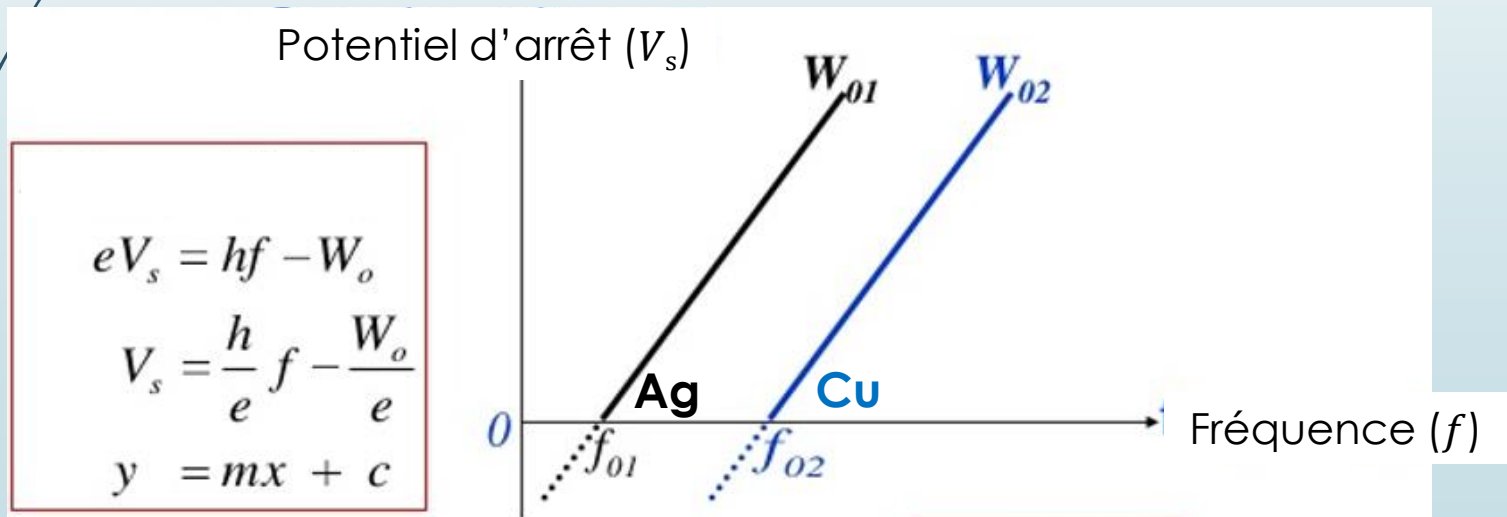
Intensité lumineuse I fixe et ν varie



Donc V_0 dépend de la fréquence de la lumière incidente (ν) et pas de l'intensité de cette lumière

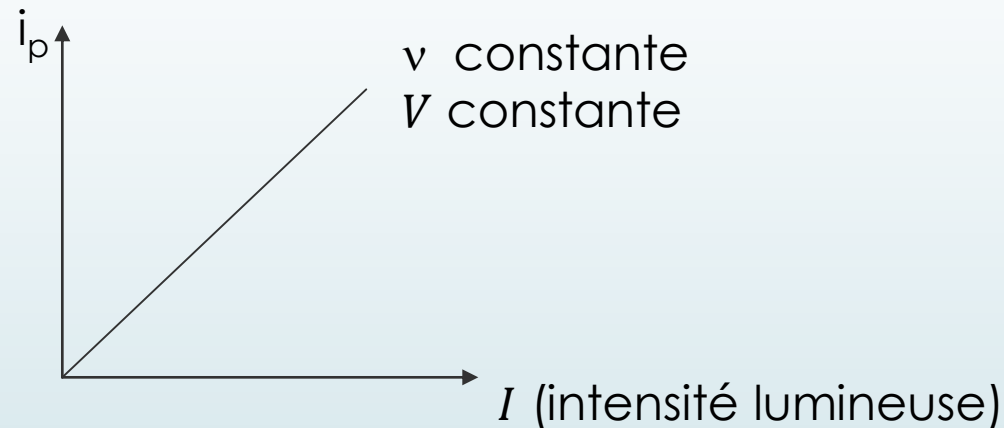
3 - On fait varier la fréquence (f ou ν) et on mesure V_0 pour différents atomes

Il n'y a pas d'effet photoélectrique c.à.d aucun électron n'est émis (arraché) en dessous d'une fréquence seuil f_0 ou ν_0 appelée seuil photoélectrique. La fréquence seuil dépend du métal



Dans cette équation V_s est le potentiel d'arrêt c'est-à-dire V_0

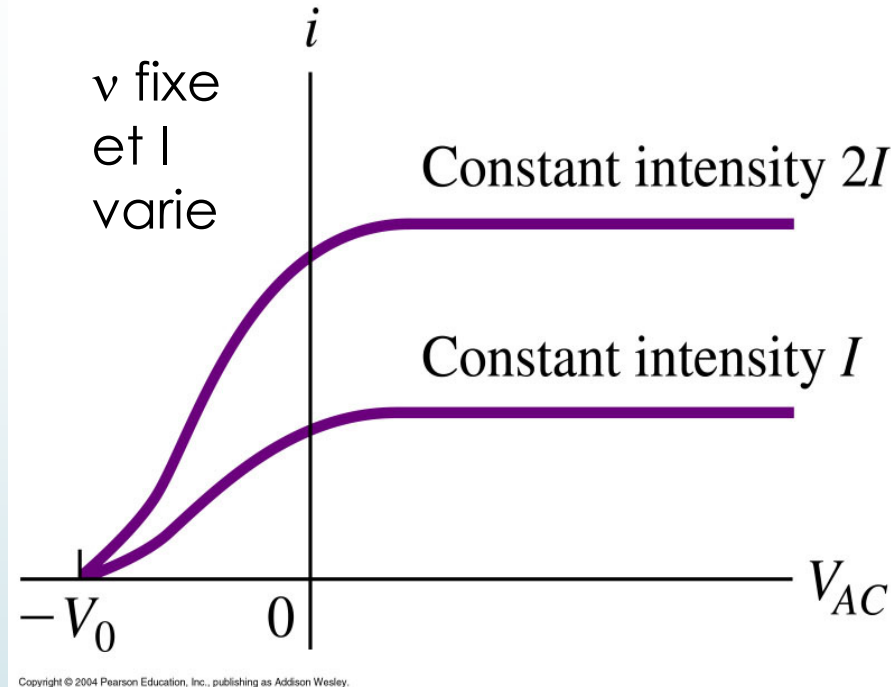
4 - Si $\nu = \text{cte}$, i_p (courant) $\nearrow \nearrow$ avec l'augmentation de l'intensité lumineuse.



5 - Les photons sont émis presque immédiatement après l'illumination de la cathode indépendamment de l'intensité lumineuse incidente, le temps $< 10^{-9}$ sec

Interprétation classique :

Résultat 1:

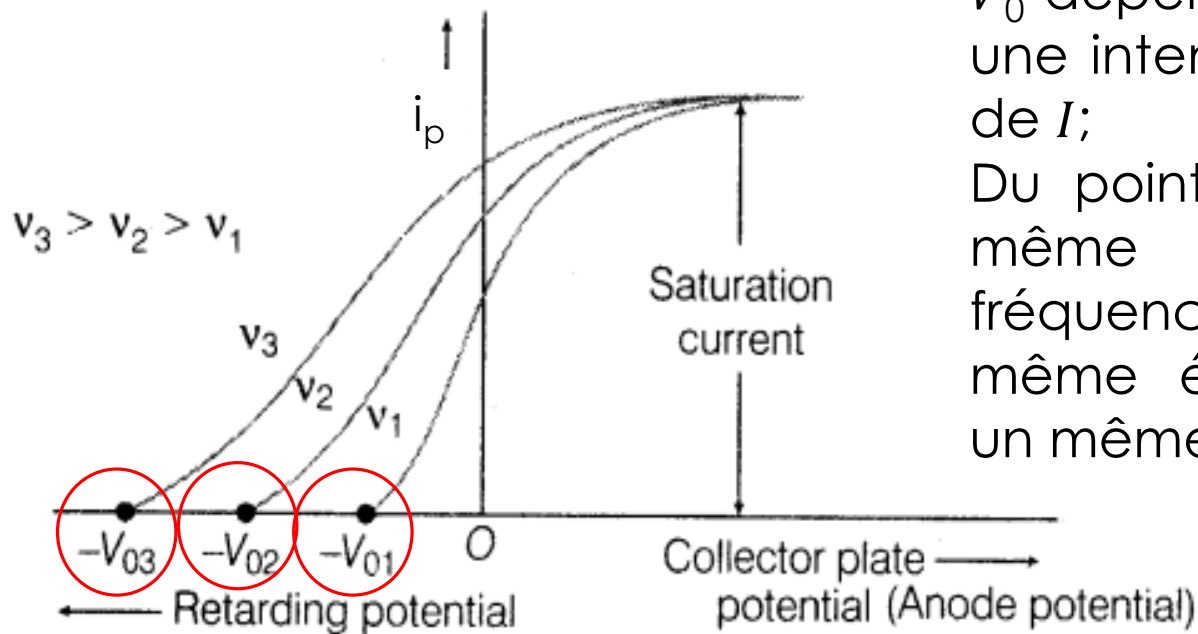


La quantité totale d'énergie dans une onde lumineuse augmente avec l'intensité I , donc les e^- émis devraient avoir plus d'énergie si I augmente, donc V_0 devrait varier.

Ce qui contredit les résultats expérimentaux

Interprétation classique :

Résultat 2:



V_0 dépend de la fréquence pour une intensité donnée et non pas de I ;

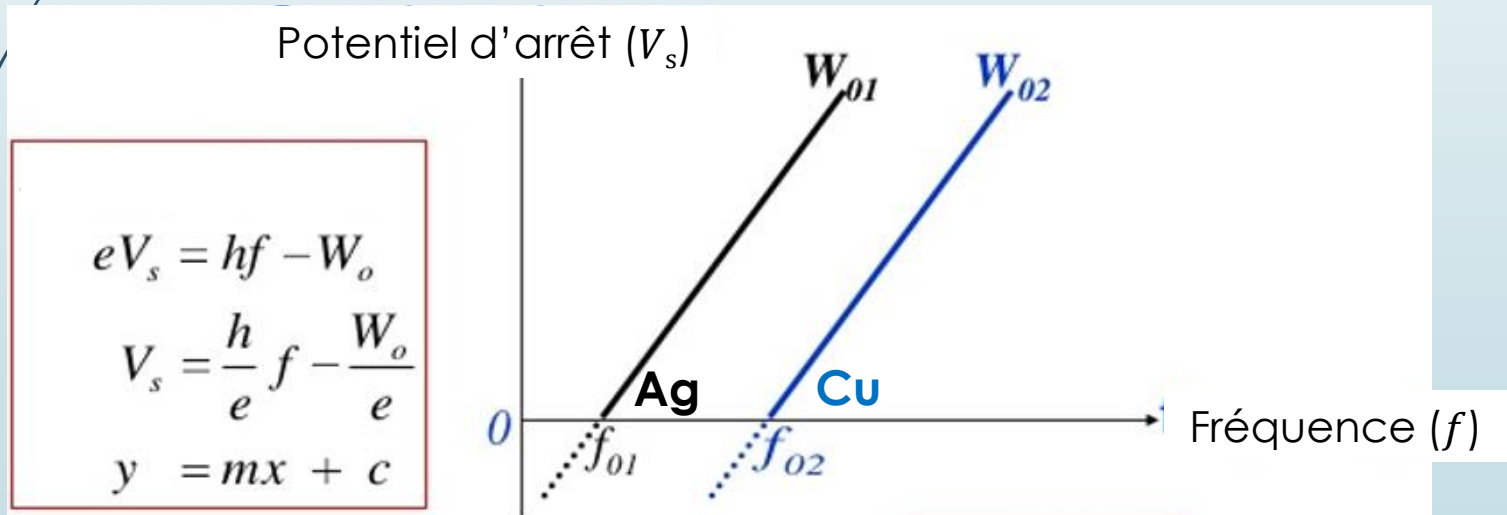
Du point de vue classique une même intensité à différentes fréquences devrait donner une même énergie cinétique donc un même V_0

Ce qui contredit les résultats expérimentaux

Interprétation classique :

Résultat 3:

la fréquence de seuil ne peut pas s'expliquer par la théorie classique qui dit que, **même pour les basses fréquences on devrait s'attendre à ce que la lumière puisse éjecter des électrons en fournissant suffisamment d'énergie c.à.d en augmentant l'intensité de la source.**



Ce qui contredit les résultats expérimentaux

Interprétation quantique :

L'énergie d'un rayonnement est quantifiée, sa distribution n'est pas continue. **L'énergie ne peut être échangée que par unité entière de $h\nu$**

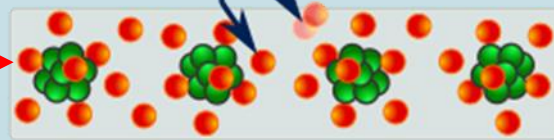
Einstein a proposé qu'en plus de son aspect ondulatoire, il faut considérer l'aspect corpusculaire de la lumière (c'est-à-dire que la lumière est constituée de petits corpuscules appelés photons transportant une énergie $E = h\nu$). Le photon se déplace à la vitesse de la lumière c dans le vide.

Photon d'énergie $h\nu$

Electron éjecté

Energie cinétique maximale

Électron lié au métal : énergie d'extraction de l'électron du métal (W_0)



$$h\nu = W_0 + E_{max}$$
$$h\nu = W_0 + \frac{1}{2}mv_{max}^2$$

Interprétation quantique :

$$h\nu = W_0 + E_{max} \Rightarrow h\nu = W_0 + \frac{1}{2}mv_{max}^2$$

$$E_{max} = eV_0$$



V_0 est le potentiel d'arrêt

$$eV_0 = h\nu - W_0$$

- L'énergie de chaque photon est inchangé
- Elle change quand on change ν
- L'Ec max des e- arrachés ne change pas si ν ne change pas
- V_0 ne change pas si ν ne change pas

Donc E_{max} et V_0 ne dépendent que de ν et de W_0 et sont indépendants de l'intensité lumineuse I .

Tant que ν n'est pas supérieur à ν_0 aucun électron n'est éjecté du métal

Interprétation quantique :

Pour $\nu = \nu_0$, l'énergie du photon incident est $E = h\nu_0$, les électrons sont juste éjectés et non pas d'énergie cinétique

$$E_{max} = 0 \quad \Rightarrow \quad h\nu_0 = W_0$$

Pour $\nu > \nu_0$ les électrons sont éjectés et ont une énergie cinétique E_{max}

$$h\nu = h\nu_0 + E_{max} \quad \text{avec} \quad E_{max} = \frac{1}{2}mv_{max}^2$$

$$E_{max} = eV_0$$

$$E_{max} = h(\nu - \nu_0) = h\nu - h\nu_0$$

Interprétation quantique : En Résumé

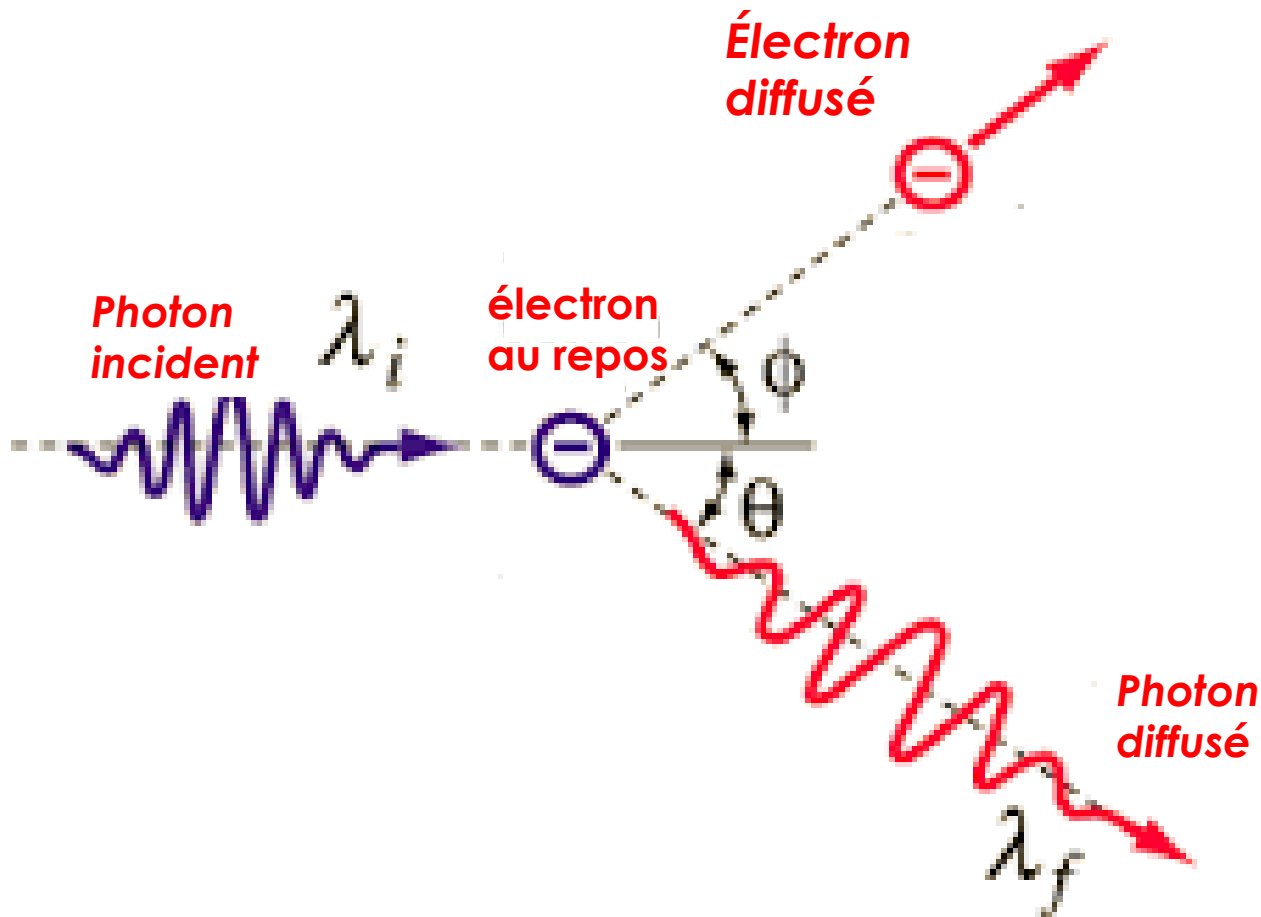
- ✓ Pour une fréquence incidente ν en dessous d'une certaine valeur (« seuil ») de la fréquence du rayonnement, notée ν_0 , aucun électron n'est émis,
- ✓ Pour une fréquence incidente ν au-dessus de la fréquence seuil ν_0 ($\nu > \nu_0$) des électrons sont émis, et l'effet photoélectrique est observé.
- ✓ L'émission d'électrons n'est pas conditionnée par l'intensité du rayonnement reçu mais uniquement par sa fréquence. Ainsi, si l'on augmente, même fortement, l'intensité du rayonnement à une fréquence inférieure au seuil d'émission des électrons, aucun électron ne sera émis.

L'effet photoélectrique se traduit donc par l'absorption de certains photons par le métal : si l'énergie d'un photon ($E = h\nu$) est supérieure à l'énergie liant un électron à un atome du métal ($W_0 = h\nu_0$), cet électron peut alors être éjecté du métal, acquérant une énergie cinétique ($E_{max} = \frac{1}{2}mv_{max}^2 = eV_0$) et créant un courant électrique entre l'anode et la cathode.

Ceci se traduit par l'équation d'Einstein : $h\nu = W_0 + E_{max}$

4 - Effet Compton

Un faisceau électromagnétique de longueur d'onde incident λ_i envoyé sur une cible, interagit avec les électrons au repos et liés à la cible, subit une déviation (diffusion) avec changement de la longueur d'onde λ_f .



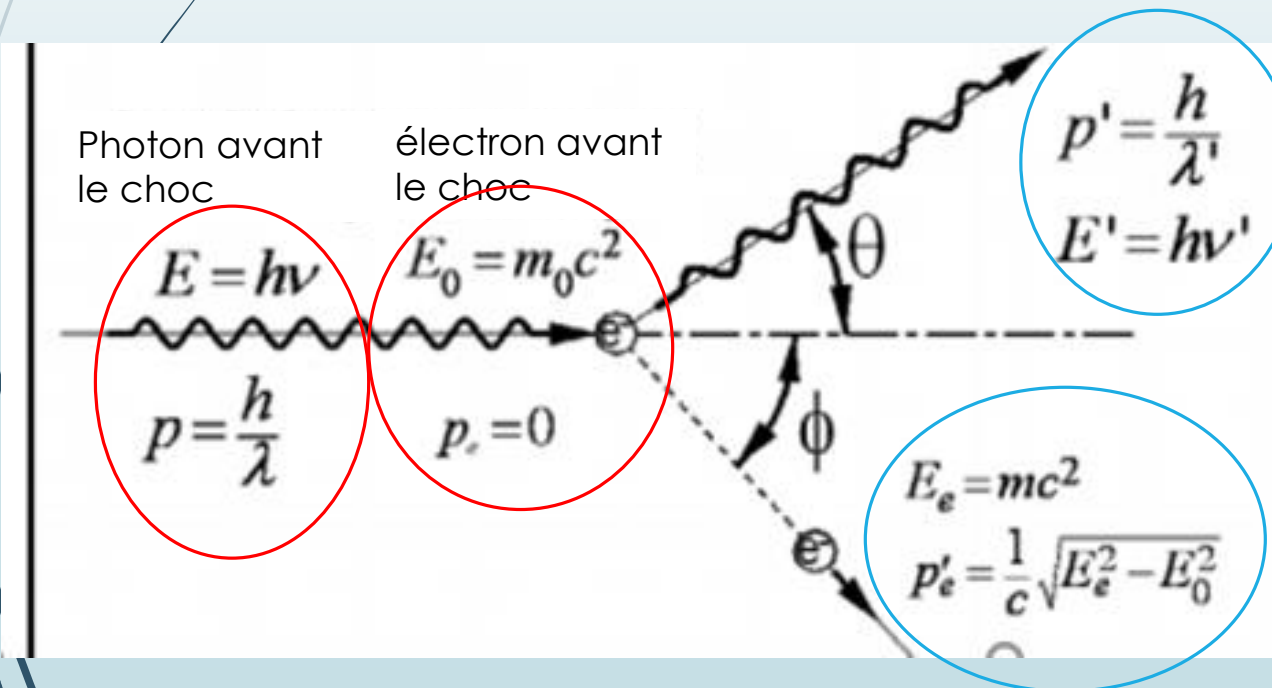
Un photon incident est diffusé par un seul électron de la cible, **cette interaction est traitée comme une collision élastique entre le photon et l'électron.**

4 - Effet Compton

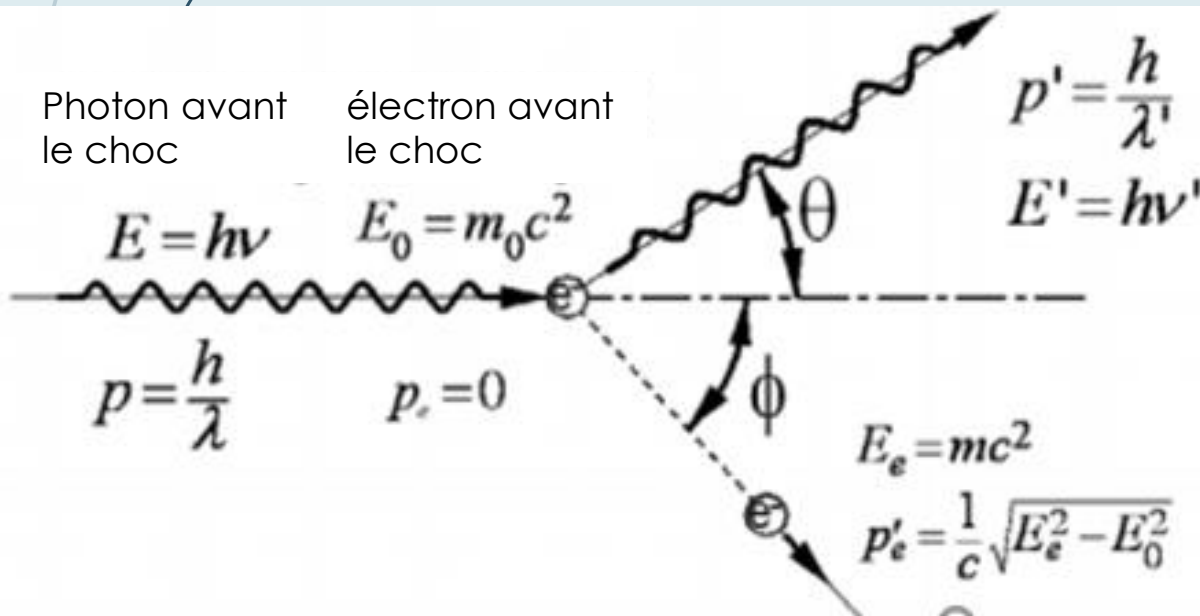
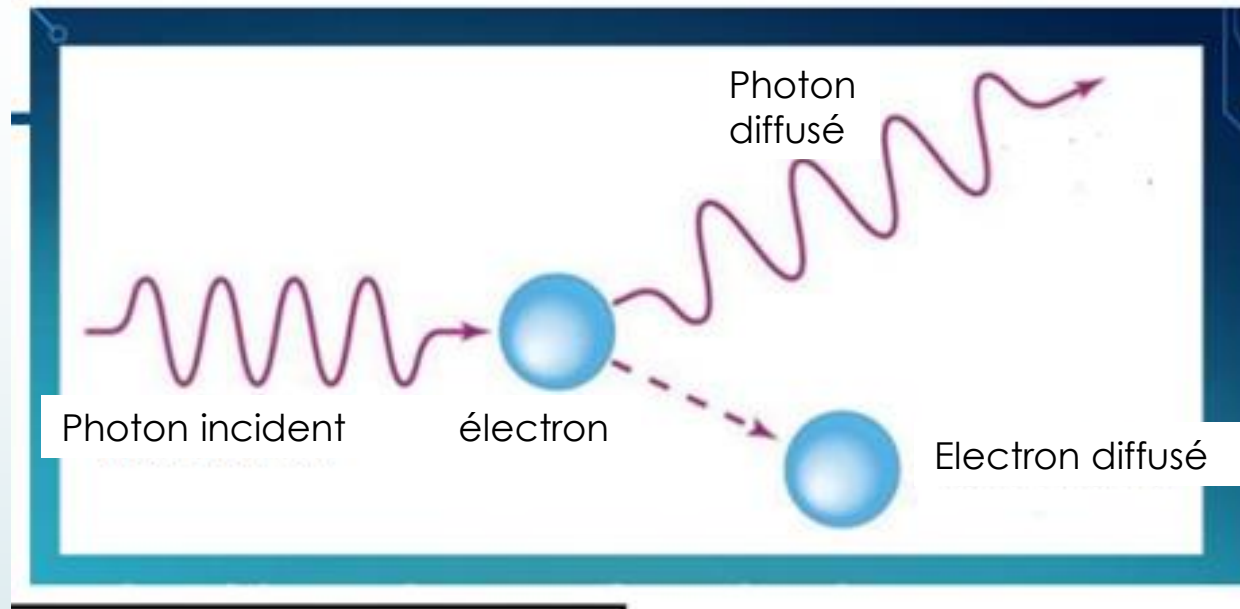
On traite le photon comme une particule :

Ayant une énergie : $E = h\nu = h \frac{c}{\lambda}$

Et une quantité de mouvement : $p = \frac{h}{\lambda} = \frac{hc}{\lambda c} = \frac{E}{c} = \frac{h\nu}{c}$



4 - Effet Compton



Photon après le choc

électron après le choc

4 - Effet Compton

Conservation de la quantité
du mouvement

$$p = p' \cos \theta + p'_e \cos \phi \quad \text{Projection x}$$

$$0 = p' \sin \theta + (-) p'_e \sin \phi \quad \text{Projection y}$$

**Hypothèse quantique
introduit par Compton :**
l'impulsion du photon est
relié à sa longueur d'onde
(**dualité onde-corpuscule**)
 $p = h/\lambda = h\nu / c$, soit $h\nu = pc$

Conservation d'énergie

$$h\nu + E_0 = h\nu' + E_e .$$

$$E_e^2 = (p'_e c)^2 + E_0^2$$

$$E_e = \sqrt{(p'_e c)^2 + E_0^2} .$$

$$h\nu + E_0 = h\nu' + \sqrt{(p'_e c)^2 + E_0^2} .$$

4 - Effet Compton



$$pc + E_0 = p'c + \sqrt{(p'_e c)^2 + E_0^2}.$$

En réarrangement on a :

$$(p - p')c + E_0 = \sqrt{(p'_e c)^2 + E_0^2}$$

et

$$(p - p')^2 c^2 + E_0^2 + 2(p - p')cE_0 = (p'_e c)^2 + E_0^2$$

On développe l'expression et on simplifie :

$$(A) \quad p^2 + p'^2 - 2pp' + \frac{2(p - p')E_0}{c} = p_e'^2.$$

4 - Effet Compton

D'après les expressions de la projection de la quantité de mouvement, on a:

$$p'_e \cos \phi = p - p' \cos \theta,$$

$$p'_e \sin \phi = p' \sin \theta,$$

On élève membre à membre au carré

$$p_e'^2 \cos^2 \phi = p^2 + p'^2 \cos^2 \theta - 2pp' \cos \theta, \quad (B)$$

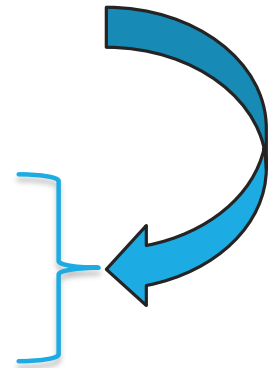
$$p_e'^2 \sin^2 \phi = p'^2 \sin^2 \theta. \quad (C)$$

Ensuite on additionne membre à membre : (B) + (C)

$$p_e'^2 (\sin^2 \phi + \cos^2 \phi) = p^2 + p'^2 (\sin^2 \theta + \cos^2 \theta) - 2pp' \cos \theta$$

D'après la relation des identités $\cos^2 x + \sin^2 x = 1$ On a:

$$p_e'^2 = p^2 + p'^2 - 2pp' \cos \theta. \quad (I)$$



4 - Effet Compton

On remplace la relation (I) dans (A), on obtient:

$$p^2 + p'^2 - 2pp' + \frac{2(p - p')E_0}{c} = p^2 + p'^2 - 2pp'\cos\theta$$

On simplifie

$$\frac{2(p - p')E_0}{c} = 2pp' - 2pp'\cos\theta,$$

et

$$\frac{1}{p'} - \frac{1}{p} = \frac{c}{E_0} [1 - \cos\theta].$$

Résultat très important

On utilise les relations entre quantité de mouvement, énergie, longueur d'onde et fréquence d'un photon

$$p = \frac{h}{\lambda} = \frac{hc}{\lambda c} = \frac{h\nu}{c} = \frac{E}{c}$$

On peut transformer la relation

$$\frac{1}{E'} - \frac{1}{E} = \frac{1}{E_0} [1 - \cos\theta]$$

$$\lambda_f - \lambda_i = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos\theta)$$

$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{m_0 c} (1 - \cos\theta)$$

4 - Effet Compton

$$\lambda' - \lambda = \lambda_f - \lambda_i = \text{décallage de compton}$$

Pour expliquer l'effet Compton



La théorie des photons

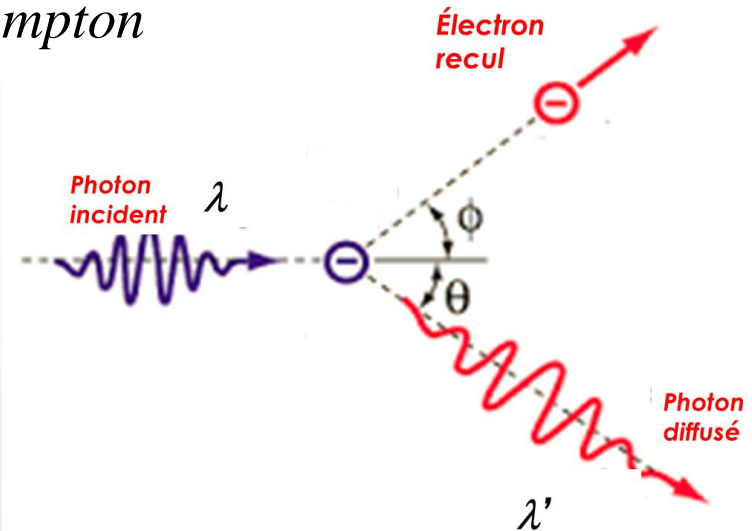


On traite le photon comme une particule en collision avec l'électron initialement au repos



Ainsi le photon donne de l'énergie et la quantité de mouvement à l'électron

Le photon λ' perd une partie de son énergie lors du choc avec l'électron. Le photon diffusé a donc moins d'énergie. Bien qu'ayant moins d'énergie, le photon diffusé ne ralentit pas car le photon doit se déplacer à la vitesse de la lumière.



4 - Effet Compton

Energie du photon : $E_{\text{photon}} = h\nu$

E_{photon}
Le photon perd de l'énergie



La fréquence décale vers les plus basse fréquence



λ' devient plus grand



$\lambda' > \lambda$

La notion d'onde et de particule qui sont séparées en mécanique classique deviennent deux facettes d'un même phénomène, décrit de manière mathématique par sa fonction d'onde. En particulier, l'expérience prouve que la lumière peut se comporter comme des particules (**photons, mis en évidence par l'effet photo-électrique**) ou comme une onde (**rayonnement produisant des interférences**) selon le contexte expérimental, les électrons et autres particules pouvant également se comporter de manière ondulatoire.

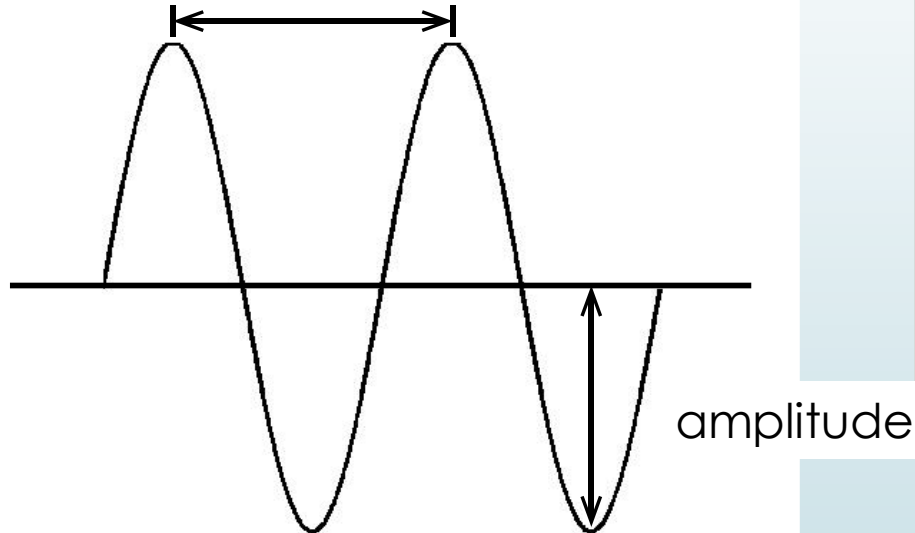
L'hypothèse ondulatoire de Louis De Broglie (1923) permet la conciliation de l'aspect corpusculaire (ou particule) et ondulatoire de la lumière et traduit par la dualité onde-particule.

5 - Dualité onde-particule

Aspect ondulatoire

Les ondes lumineuses

Longueur d'onde



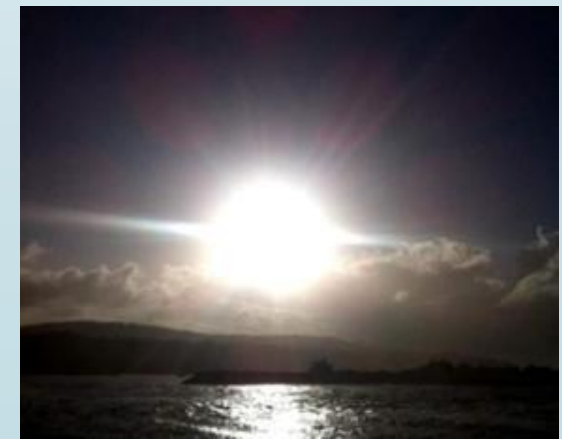
Les ondes lumineuses

Caractérisé par:

- Amplitude (A)
- Fréquence (ν)
- longueur d'onde (λ)

Maxwell a montré que
l'énergie des ondes EM $\sim A^2$

Jusqu'en 1900 environ, la théorie classique des ondes de la lumière décrivait la plupart des phénomènes observés



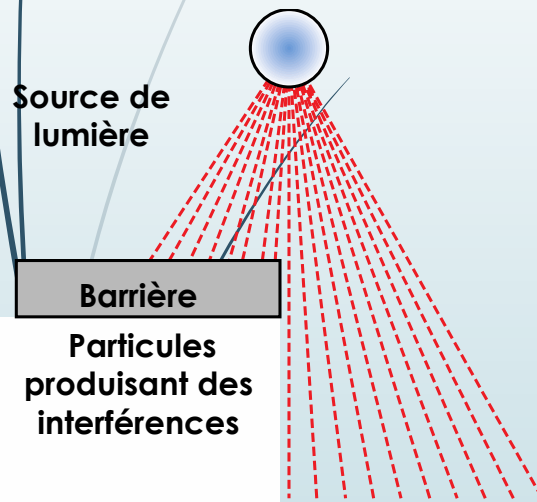
5 - Dualité onde-particule

Les photons sont-ils des particules ou des ondes?

Newton croyait que la lumière était des particules:

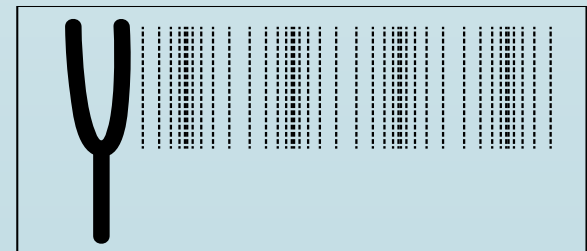


- La lumière se déplace en ligne droite !



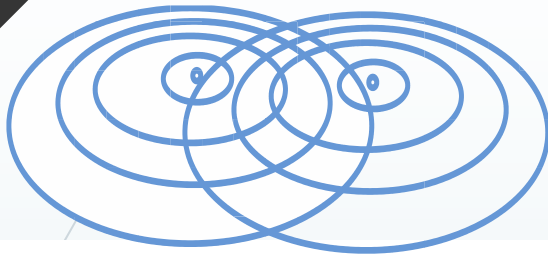
Qu'est ce qui « ondule » dans une onde EM ?

Une onde est une vibration d'un milieu à travers lequel elle se propage, par exemple des vagues d'eau, des ondes se propageant sur une corde



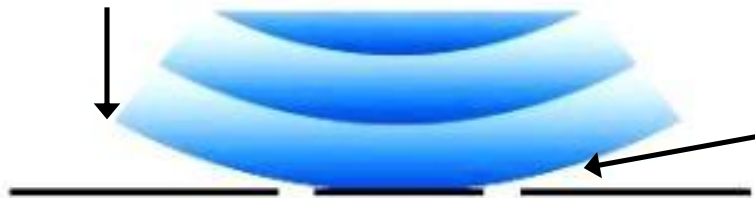
5 - Dualité onde-particule

Nous les avons décrites comme des VAGUES jusqu'à présent



Expérience de Young

Direction de
Propagation
de la lumière

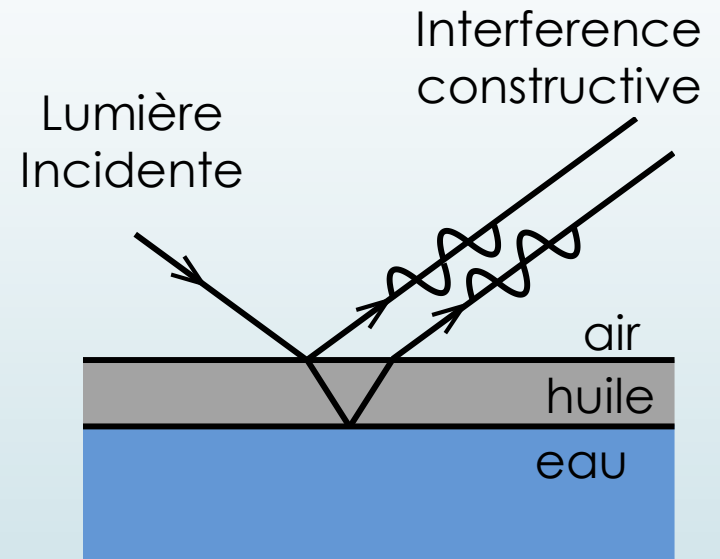
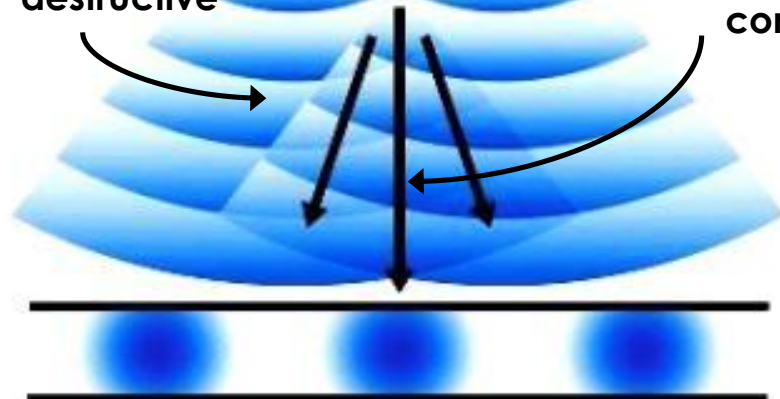


fente

Interférence
destructive

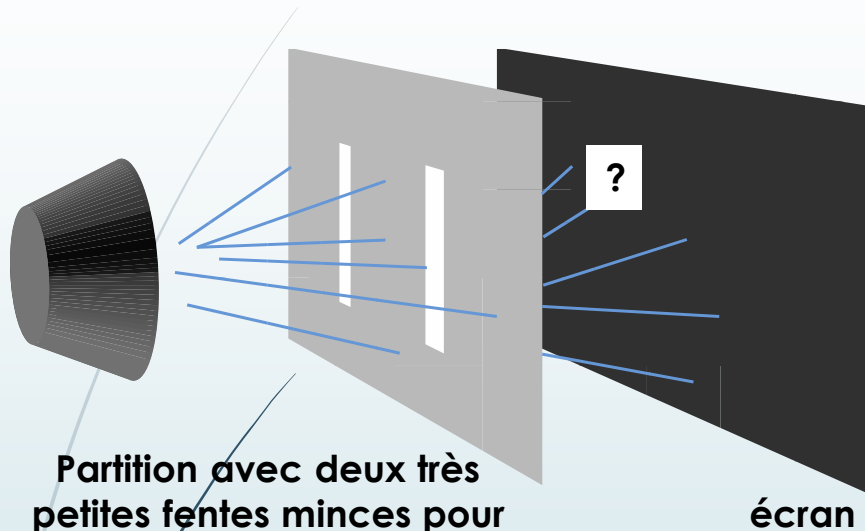
Interférence
constructive

Écran



5 - Dualité onde-particule

Expérience de double fente de Thomas Young



Mais que se passe-t-il lorsque nous réduisons l'intensité de la lumière incidente... tout devrait simplement s'assombrir... Non?

L'interférence est la caractéristique déterminante des ondes



5 - Dualité onde-particule

L'effet photoélectrique: aspect corpusculaire ou particule

■ Lorsque la lumière incidente arrive sur certaines surfaces métalliques, des électrons sont émis par la surface

- C'est ce qu'on appelle l'effet photoélectrique
- Les électrons émis sont appelés photoélectrons

Image classique

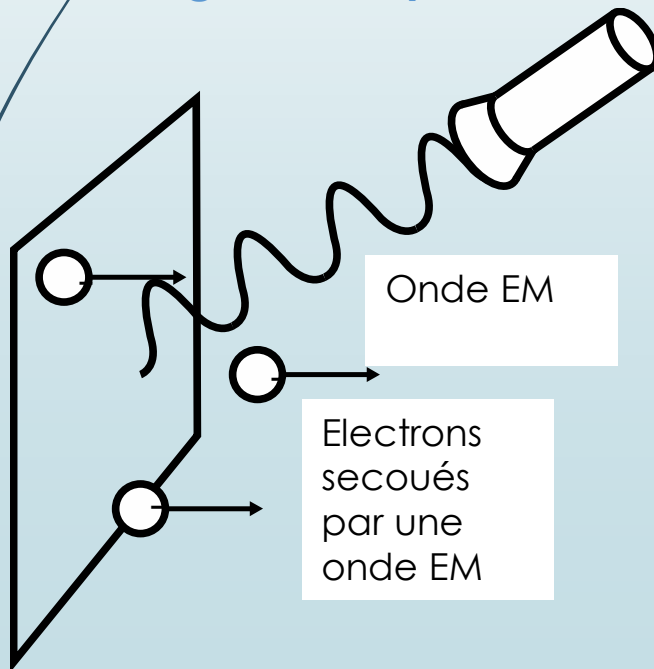
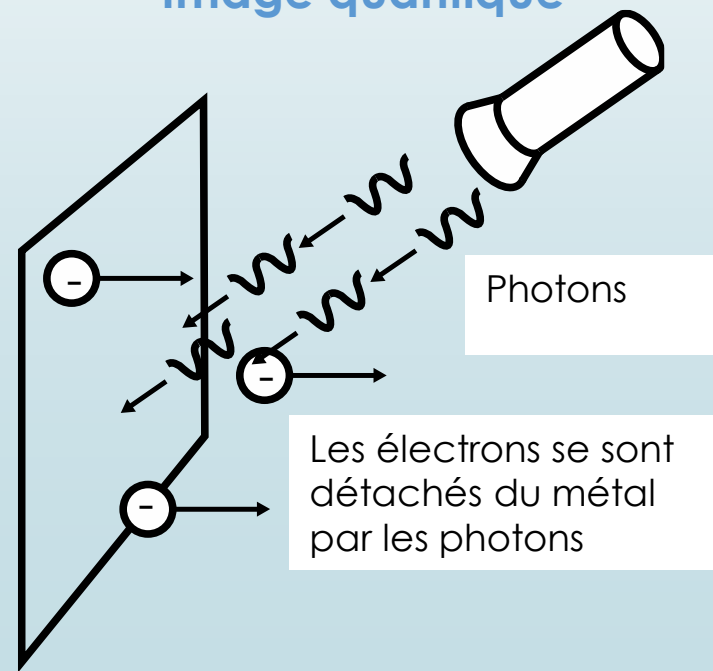


Image quantique

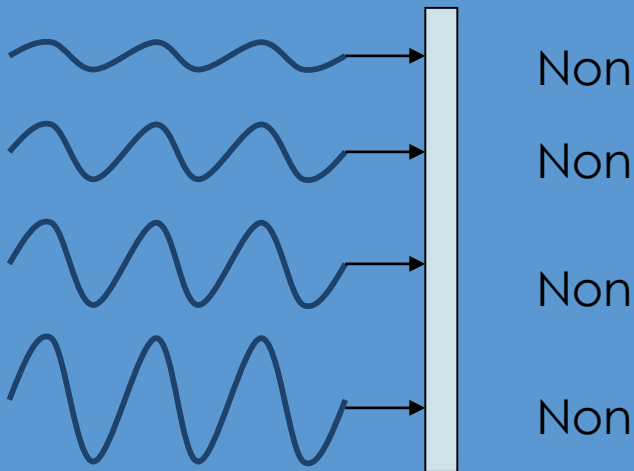


Observation de l'effet photoélectrique... un phénomène quantique

Méthode classique

Augmenter l'énergie ou l'intensité en augmentant l'amplitude

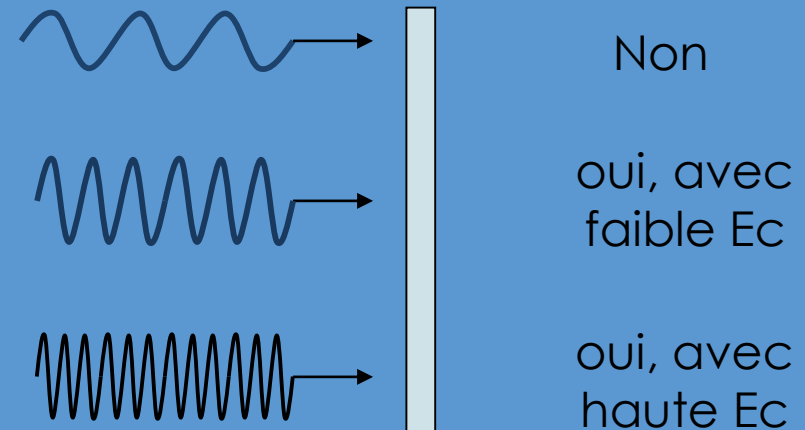
électrons émis ?



Et si on essayait l'interprétation quantique ?

Longueur d'onde ou fréquence variable, amplitude fixe

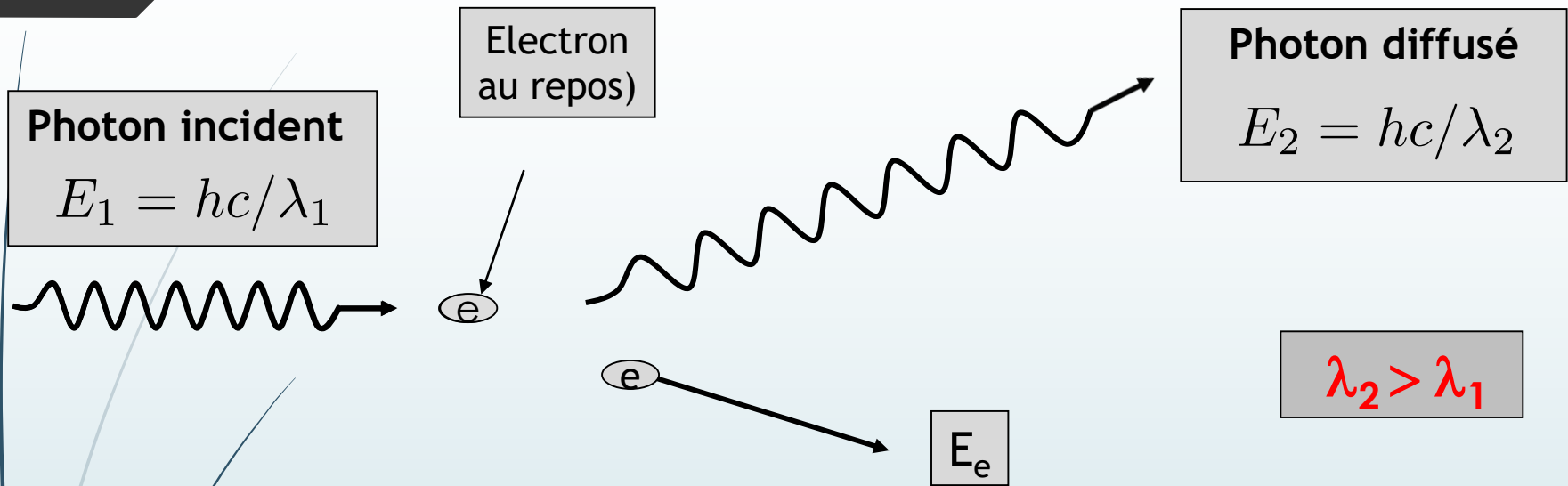
électrons émis ?



Aucun électron n'a été émis tant que la fréquence de la lumière incidente n'a pas dépassée la fréquence seuil du métal

5 - Dualité onde-particule

Effet Compton: aspect corpusculaire



Compton a découvert que si vous traitez les photons comme s'ils s'agissaient de particules de masse nulle, avec une énergie $E = hc/\lambda$ et de quantité de mouvement $p = h/\lambda$ (relation de De Broglie)

→ La collision se comporte comme si deux boules de billard entraient en collision!

Le photon se comporte comme une particule avec l'énergie et la quantité de mouvement comme indiqué ci-dessus!

Relation de Louis De Broglie

En combinant les équations de la relativité d'Einstein ($E = pc$) et de Planck (quantum d'énergie $E = h\nu$) on a : $E = pc = h\nu$.

Soit $p = \frac{h\nu}{c}$ or $\nu = \frac{c}{\lambda}$ donc :

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

De Broglie généralise le concept aux particules matérielles : à **toute particule de masse m et d'impulsion ou quantité de mouvement $p = mv$** , on associe une longueur d'onde :

$$\lambda = \frac{h}{mv}$$

Toutes les entités présentent les deux caractères indissociables de **particule** et d'**onde** :

Une **particule** lors des interactions lumière/matière.

Une **onde** lors de la propagation dans la matière ou le vide.

Ces caractères se manifestent qu'à l'échelle microscopique.

Le photon (ou quantum) est un paquet d'énergie se déplaçant à la vitesse de la lumière c .

Selon la formule de la théorie de la relativité,

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

La masse en mouvement du photon est $m = m_0 / 0 = \infty$ ce qui est impossible. m est une quantité indéterminée.

On suppose donc que m_0 est nulle.

m est une quantité indéterminée : les photons ne sont jamais au repos

Pour un photon d'énergie $E = h\nu$, si m est la masse en mouvement du photon, selon la théorie de la relativité restreinte, $E = mc^2$. Par conséquent,

$$E = h\nu = mc^2$$

6 - Photon

soit

$$m = \frac{h\nu}{c^2} = \frac{E}{c^2}$$

À partir de la relation

$$E^2 = p^2 c^2 + m_0^2 c^4$$

puisque $m_0 = 0$, l'énergie du photon est aussi donnée par

$$E = pc$$

Et sa quantité de mouvement est

$$p = \frac{E}{c} = \frac{mc^2}{c} = mc$$

Qu'on peut
aussi écrire

$$p = \frac{E}{c} = \frac{h\nu}{c}$$

Ainsi, si un photon de fréquence ν doit être traité comme une particule,

$$m_0 = 0, \quad E = h\nu = mc^2, \quad m = \frac{h\nu}{c^2}, \quad p = \frac{E}{c} = \frac{h\nu}{c}$$