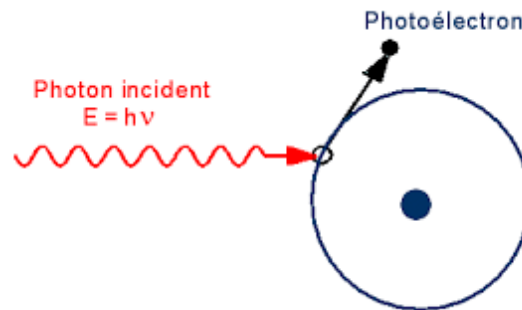


Chapitre 1

Du classique au quantique

Interaction *rayonnement-matière*



- Avec la découverte des particules subatomiques, le besoin d'un nouveau type de mécanique quantique a commencé à émerger (apparaître).
- Pour expliquer les observations, les scientifiques faisaient, deux principes:
 - 1- Le *rayonnement* et la *matière* présentent des propriétés à la fois **ondulatoires** et **corpuscules**.
 - 2- **l'énergie** est **quantifiée** en paquets discrets (appelés photons).

Les points essentiels

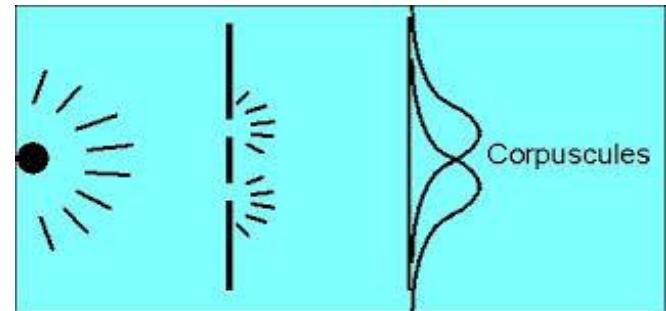
❖ Dualité Onde-Corpuscule

❖ Comportement corpusculaire des ondes

- ❖ Le rayonnement du corps noir (Planck 1900)
- ❖ Effet photoélectrique (Einstein 1905)
- ❖ Effet Compton (Compton 1923).

❑ On envoie une onde sur deux fentes.

Le passage Par les fentes crée des interférences des franges apparaissent sur l'écran.



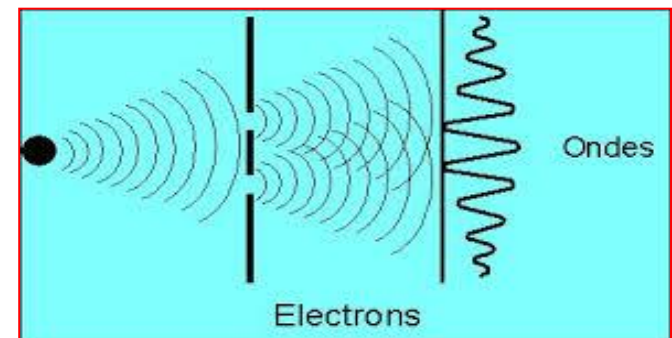
❖ Comportement ondulatoire des corpuscules

- ❖ Relation de de Broglie (1924)

❑ On envoie des particules sur deux fentes.

On détecte leur impact sur un écran:

elles arrivent n'importe où.



Dualité Onde-Corpuscule

La lumière se présente sous deux aspects :

- ❖ Un aspect *ondulatoire* ou elle est considérée comme un phénomène vibratoire se propageant par **onde**.
- ❖ Un aspect *corpusculaire* ou elle est formée de corpuscules appelés **photons** qui sont animés d'une vitesse C (célérité de la lumière) et transportent un **quantum d'énergie**.

La physique quantique (1900-1930)

La théorie quantique est née alors que les physiciens voulaient expliquer les derniers points:

- Le spectre d'émission du corps noir.
- L'effet photoélectrique.

Particules vs Ondes

- Les particules. Elles sont localisées **spatialement** et, à chaque instant, on peut connaître exactement leur **position** et leur **vitesse**.
- Les ondes. Elles ne sont pas localisées dans **l'espace**. On les caractérise par leur longueur d'onde.
- Elles transportent de l'énergie mais celle-ci est délocalisée et répartie sur tout le front d'onde.

La théorie du corps noir

Section 1

Préface

- La théorie du **corps noir** est l'un des plus vieux problèmes de la physique théorique et il est à l'origine de la physique quantique.
- On retrouve la théorie du corps noir aussi bien lorsque l'on veut comprendre fondamentalement la **lumière** et la **matière** que lorsqu'on étudie les étoiles, les trous noirs.

Deux questions simples

- *Pourquoi lorsqu'on chauffe un objet, celui-ci **émet-il** de la **lumière** ?*
- *Pourquoi la **couleur** de la lumière émise **change-t-elle** avec la **température** ?*
- ✓ C'est en découvrant les réponses à ces deux questions que les physiciens ont franchit la distance séparant la physique classique de la physique quantique.

Le problème du corps noir

- Le problème du **corps noir** consiste à comprendre et décrire mathématiquement ce qui se passe quand un morceau de **fer chauffé** passe de la couleur **rouge** à la couleur **blanche**, en émettant une quantité de lumière de plus en plus importante.



Le défi des plus grands esprits

- Le problème du corps noir a défié les plus grands esprits, de **Kirchhoff** à **Hawkins** en passant par **Planck** et **Einstein**. Il est à l'origine de la théorie quantique, du modèle atomique et des particules élémentaires.



À gauche Max Planck et à droite
Albert Einstein.

Contribution de Kirchhoff



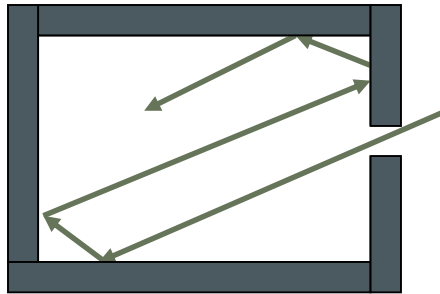
Gustav Kirchhoff

- En 1859, Kirchhoff montra que le rayonnement émis par les objets qui absorbent tout le rayonnement incident ne dépend pas de la nature de l'objet.
- Un tel objet est appelé *corps noir* car à cause des températures faibles, il est noir (il absorbe la lumière incidente et son rayonnement émis n'est pas visible).

Comment faire *un corps noir*

Kirchhoff a indiqué comment construire un corps noir. Il s'agit de former une cavité dans un corps solide dont les parois sont gardées à une température constante et uniforme T et de percer un petit trou dans l'une de ses parois.

L'ouverture est un corps noir car la lumière qui entrera dans la cavité sera absorbée par les parois de celle-ci. Le rayonnement qui sortira par l'ouverture sera uniquement le rayonnement émis par le corps noir.



Propriétés importantes du rayonnement thermique

Les chercheurs du XIX^e siècle découvrirent deux propriétés importantes du rayonnement thermique:

- À mesure que **la température augmente**, **l'intensité** du rayonnement émis par un corps **augmente** rapidement.
- Plus **la température** du corps est **élevée**, plus la **longueur d'onde** associée au maximum de la distribution du rayonnement est **courte**.

La loi du déplacement de Wien

La relation de Wien est:

$$\lambda_{\text{max}} T = 2,898 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$$

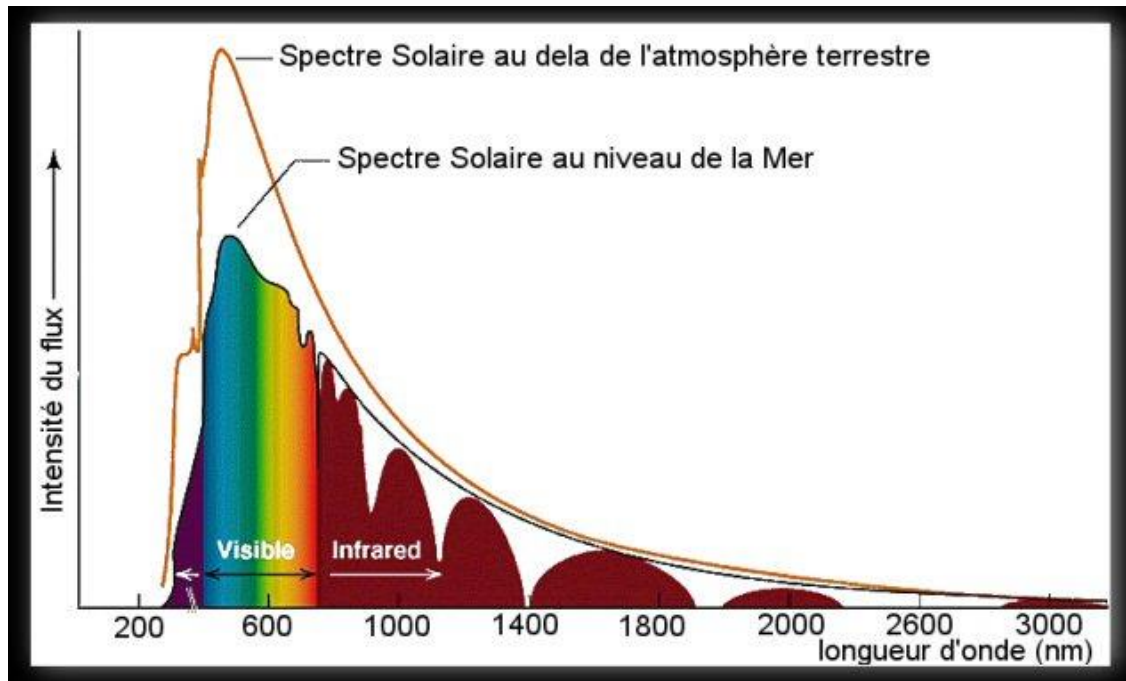
Où λ_{max} est la longueur d'onde pour laquelle l'intensité du rayonnement émis par le corps noir à une température T est maximale.

- ✓ Cette relation fait le lien entre une température et une longueur d'onde, et crée un lien entre une température et une couleur, ce qui permet de définir la température liée à la couleur de l'objet.



Application: Exemple 1

Le pic du rayonnement solaire est situé à 500 nm environ.
Déterminez la température de surface de notre Soleil.



Réponse: $5,80 \times 10^3 \text{ K}$ $\lambda_{\text{max}} T = 2,898 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$

Application: Exemple 2

La température de la peau est voisine de 35 ° C. Quelle est la longueur d'onde du pic d'intensité du rayonnement émis par la peau ?

$$\lambda_{\text{max}} T = 2,898 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$$

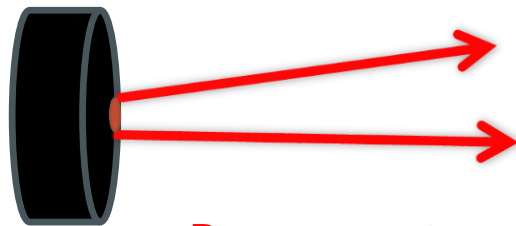
Réponse: longueur d'onde = $9,4 \times 10^{-6} \text{ m} = 9,41 \text{ } \mu\text{m}$

Un corps noir



Deux corps noir vus de face

La radiance spectrale



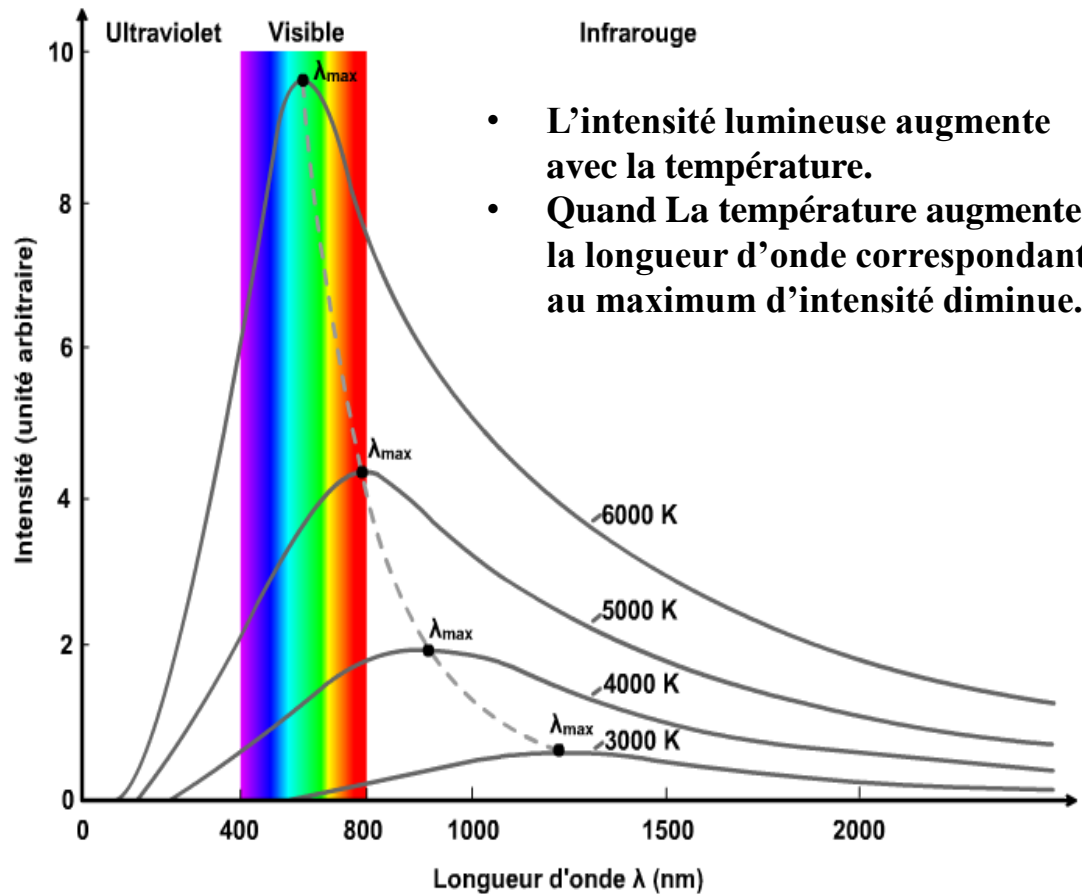
Rayonnement

T1= 3000k

T2= 5000k

T3= 6000k

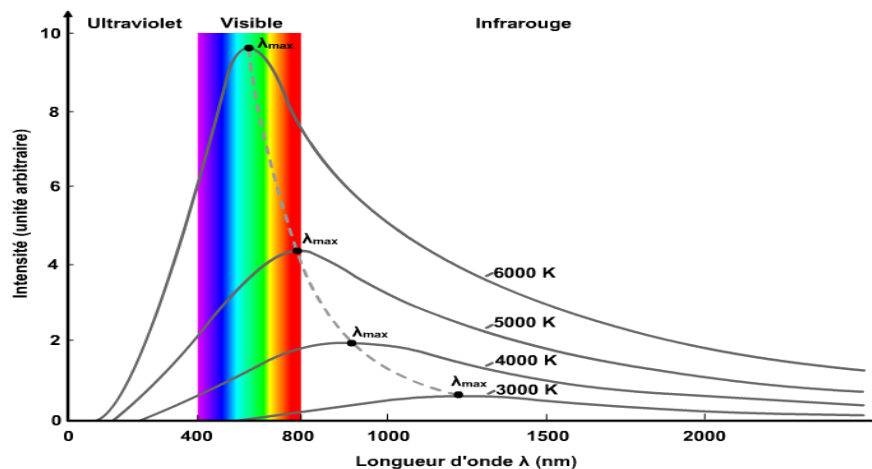
T4= 8000k



Comment expliquer ce comportement?

Données expérimentales de la distribution d'énergie du rayonnement d'un corps

- Si la **température** augmente, la quantité totale **d'énergie** augmente.
- Lorsque la température augmente, le pic est décalé vers des longueurs d'onde plus courtes.



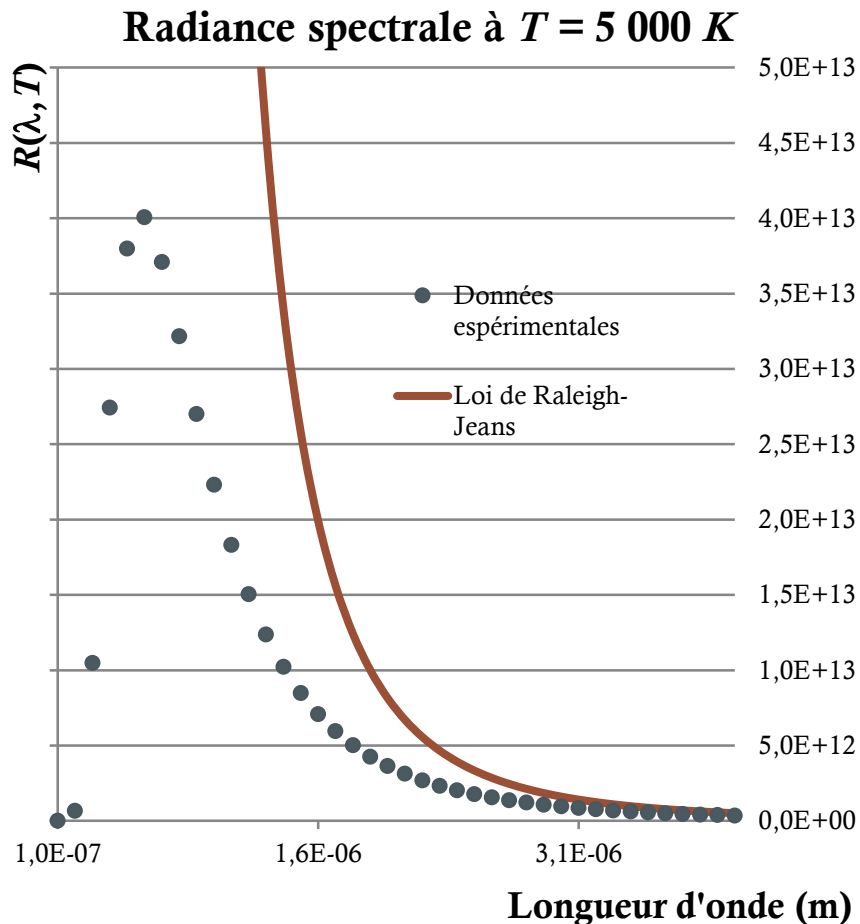
La loi de Rayleigh-Jeans



John William Rayleigh

- En 1900, *Rayleigh* proposa d'analyser les propriétés d'absorption et d'émission à l'intérieur du corps noir en le modélisant par un ensemble d'oscillateurs harmoniques pouvant absorber ou émettre la lumière pour toutes les fréquences du rayonnement.

La catastrophe de l'ultraviolet



- La théorie classique n'expliquait pas les données expérimentales.
- Pour de grandes longueurs d'onde, la loi de Rayleigh-Jeans convenait.
- Mais elle est totalement inadéquate pour des courtes longueurs d'onde (tend vers l'infini).
- Pour des très courtes longueurs d'onde, l'observation indiquait une énergie nulle.
- Cette contradiction est appelée « *catastrophe ultraviolette* ».

Loi de Max Planck

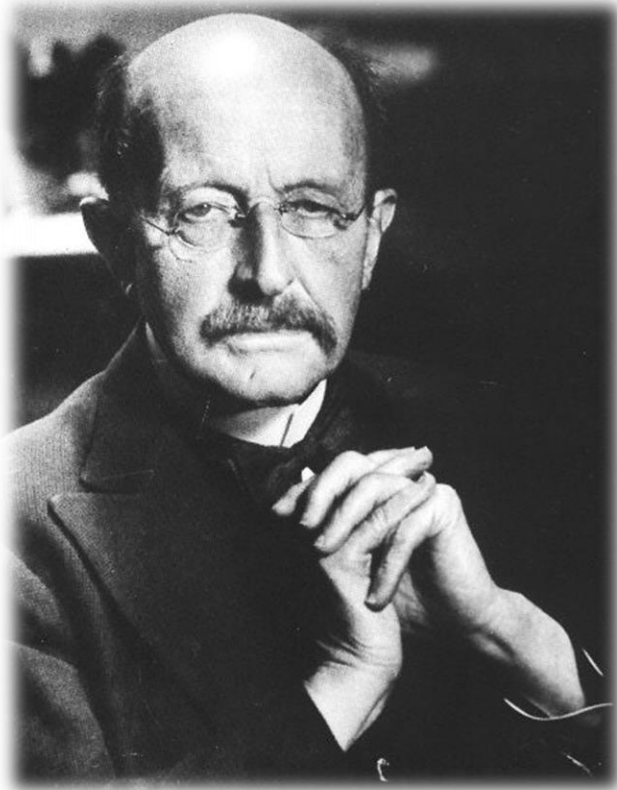
- Les échanges d'énergie entre la matière et le rayonnement ne se font pas de façon **continue** mais par quantités **discrètes** et indivisibles.

$$E = nh\nu \quad n = 1, 2, 3 \dots$$



Max Planck (23 avril 1858 - 4 octobre 1947)

Idée géniale de Planck



- Selon Planck, les parois de la cavité se comportent comme des petits oscillateurs harmoniques.
- Les oscillateurs ne pouvaient osciller qu'avec une énergie représentant un multiple de $h\nu$.

$$E = nh\nu \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

La constante de Planck

- *La matière ne peut émettre l'énergie radiante que par quantités finies proportionnelles à la fréquence. Donnée par l'expression:*

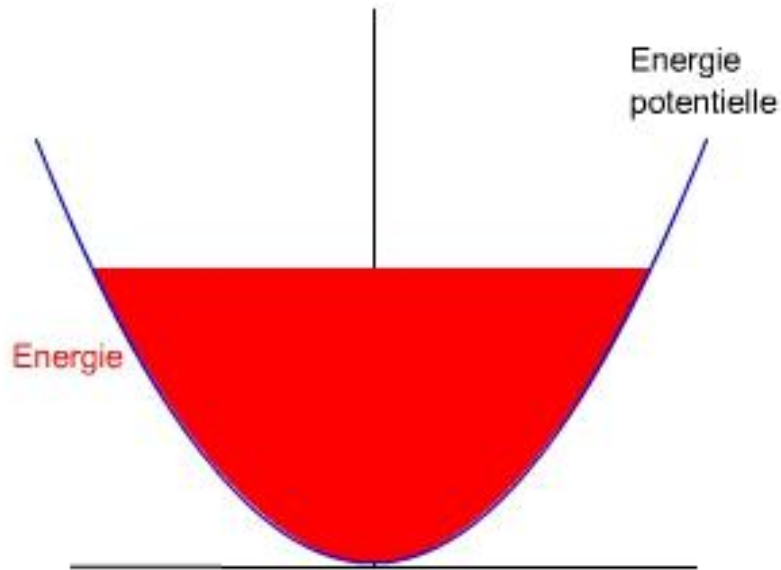
$$E = h\nu$$

E: est l'énergie (J), ν : est la fréquence (s^{-1})

- Le facteur de proportionnalité est une constante universelle, la célèbre constante de Planck: $h = 6,626 \times 10^{-34} \text{ J.s}$
- ❑ Les échanges d'énergie entre matière et rayonnement se font uniquement par des multiples entières d'une quantité minimale d'énergie E appelée quantum ou énergie du photon..

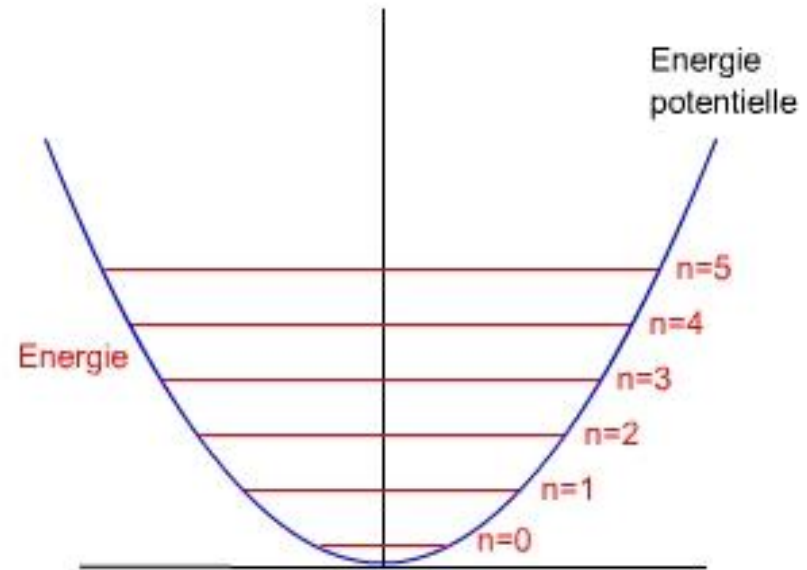
Physique classique vs physique quantique

- ❑ **Physique classique:** les échanges d'énergie se font de façon continue.



Oscillateur harmonique classique

- ❑ **Physique quantique:** les échanges se font de façon discrète par paquets d'énergie.



Oscillateur harmonique quantique

L'interprétation d'Einstein

- Einstein, en 1905, postule que chaque oscillateur possède une énergie quantifiée: nh où n est le niveau d'énergie. Il parle ici de quantité quantifiée
- C'est la naissance du photon et le début de la quantification de l'énergie...mais tous n'y croient pas.
- Il a supposé que chaque onde est composée de corpuscules: Photons. Ceux-ci transportent des quanta d'énergie $h\nu$.



L'effet photoélectrique et Einstein(1905)

- Lorsque la lumière est dirigée vers la cathode, des électrons quittent cette dernière et se déplacent vers une anode chargée positivement. Un courant électrique traverse la cellule dite photoélectrique.
- L'expérience montre que l'utilisation d'une lumière de **fréquence inférieure** à une certaine valeur appelée *le seuil de fréquence* **ne produit aucun effet**, quel que soit son **intensité**. Par contre, une fréquence **supérieure** au seuil, une intensité plus élevée provoque une augmentation du nombre d'électrons expulsés (Figure 1.1).

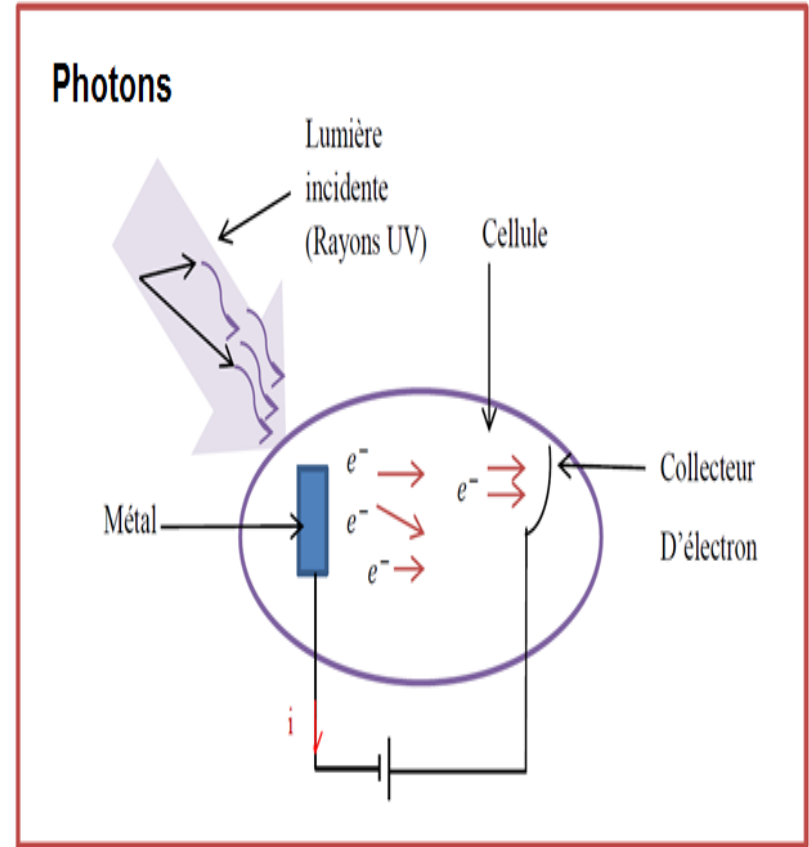
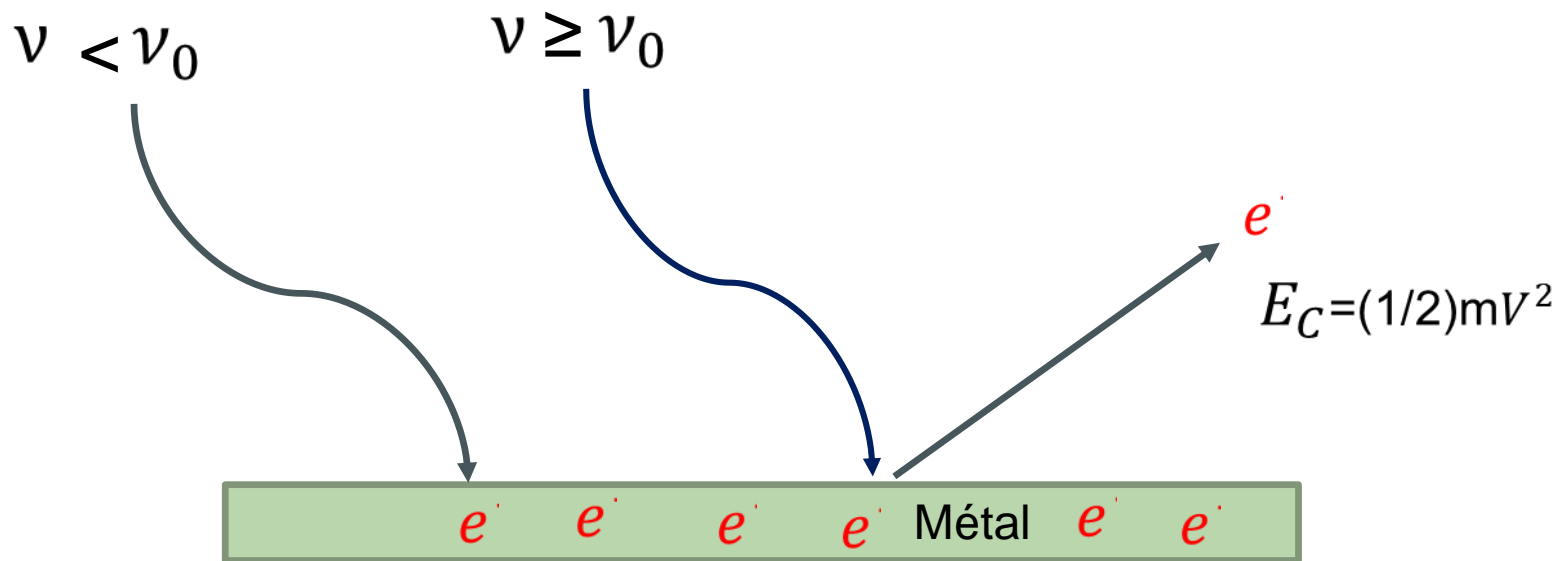


Figure 1.1 L'effet photoélectrique.

L'effet photoélectrique

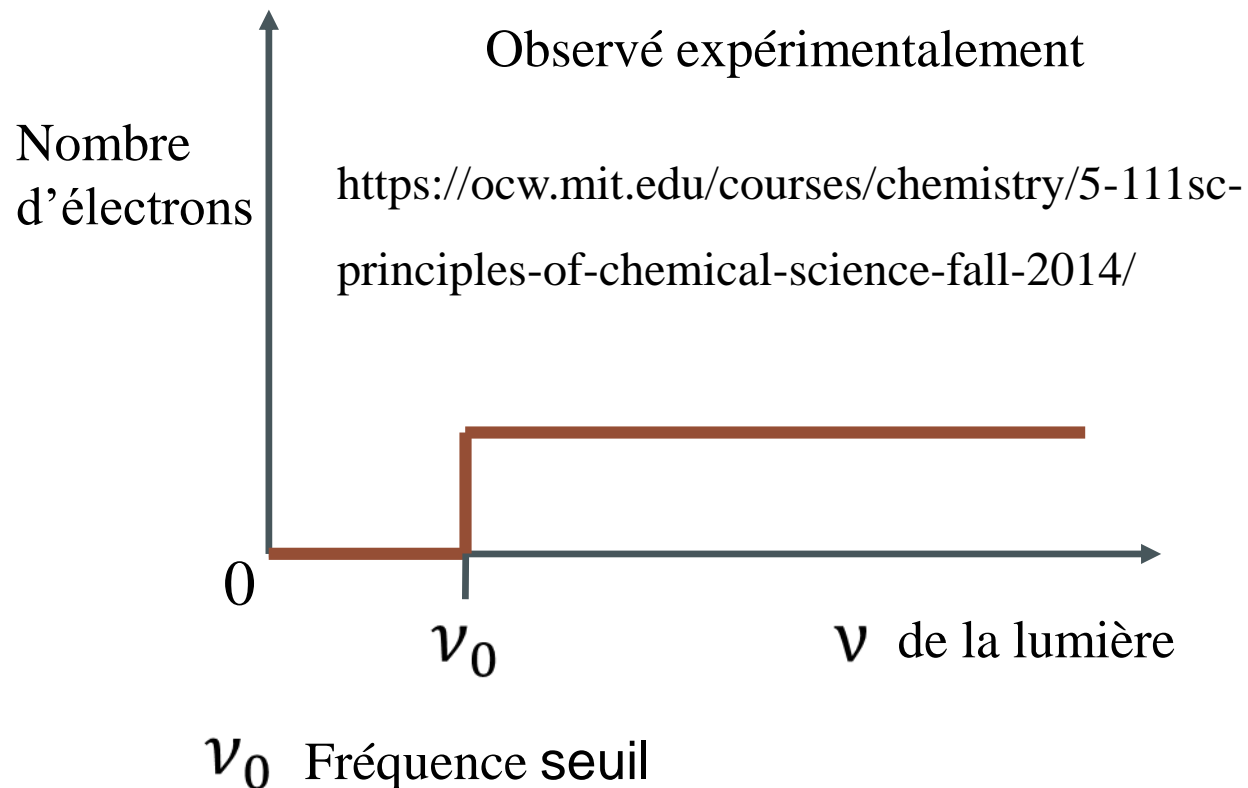
Un faisceau de lumière **UV** frappant une surface métallique peut éjecter des électrons



Pour l'éjection d'électrons

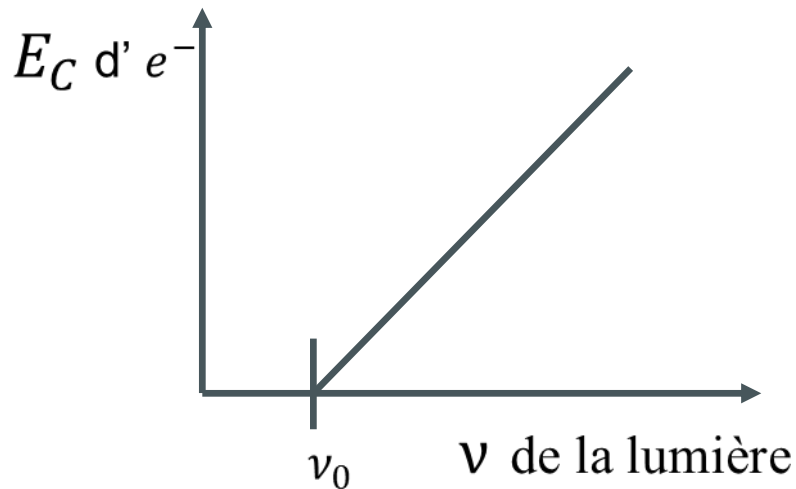
La fréquence, ν doit être égale ou supérieure à une fréquence de seuil ν_0

À l'intensité constante, **la fréquence ν** de la lumière n'a aucun effet sur **le nombre d'électrons** émis

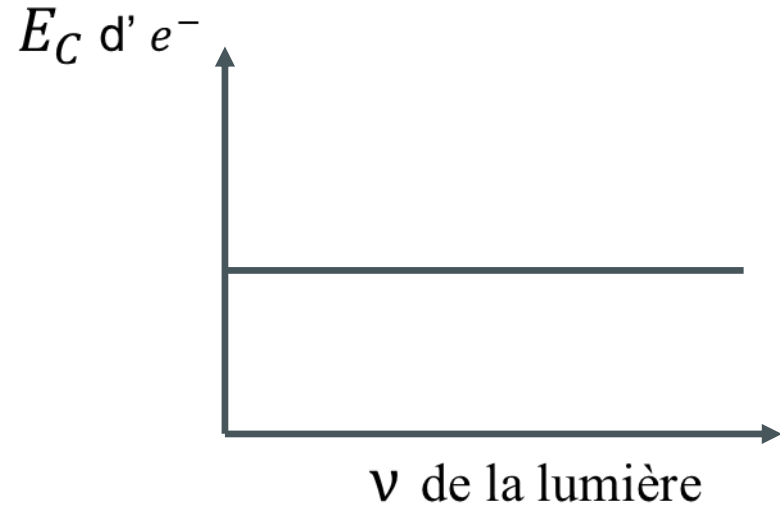


Traçant **l'énergie cinétique** E_C des électrons éjectés en fonction de **la fréquence** de la lumière incidente.

- Observé expérimentalement

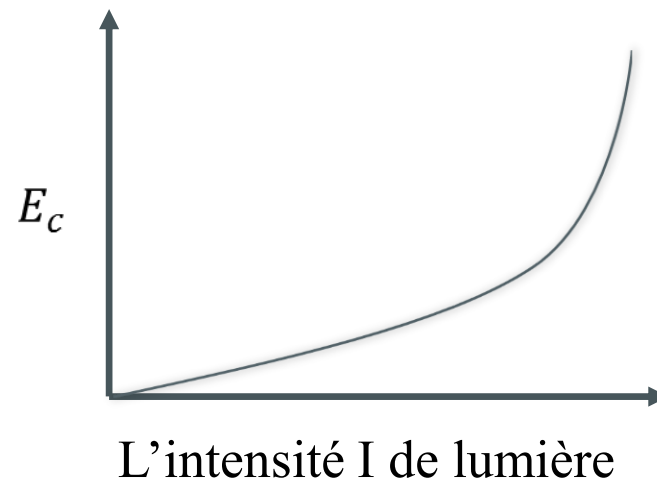
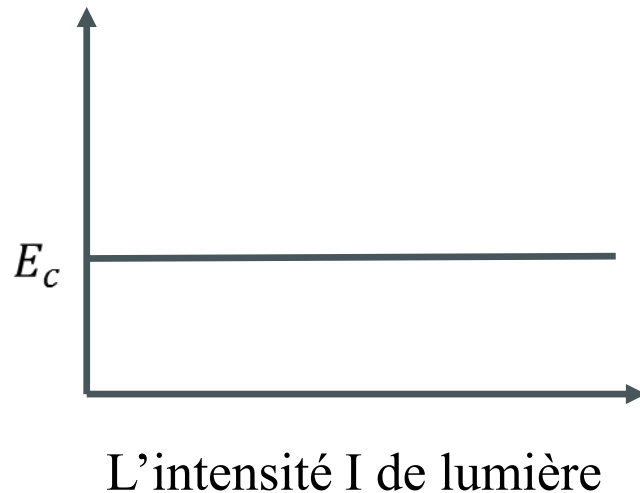


- Prédit de la physique classique



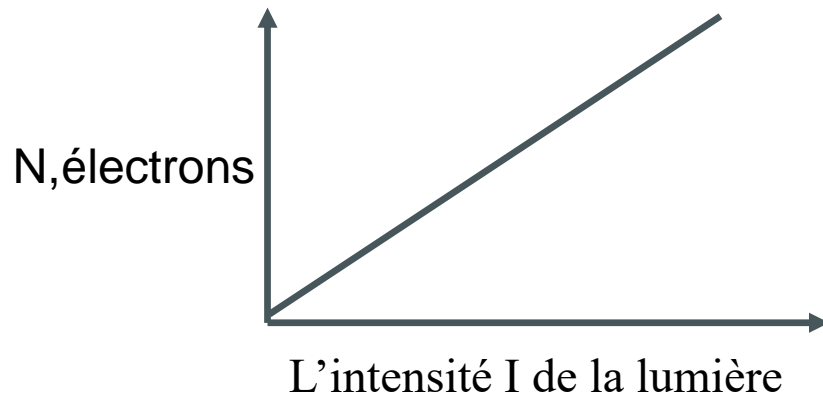
Traçant **l'énergie cinétique** E_c des électrons éjectés en fonction de **l'intensité de la lumière** incidente

- Observé expérimentalement
- Prédit de la physique classique

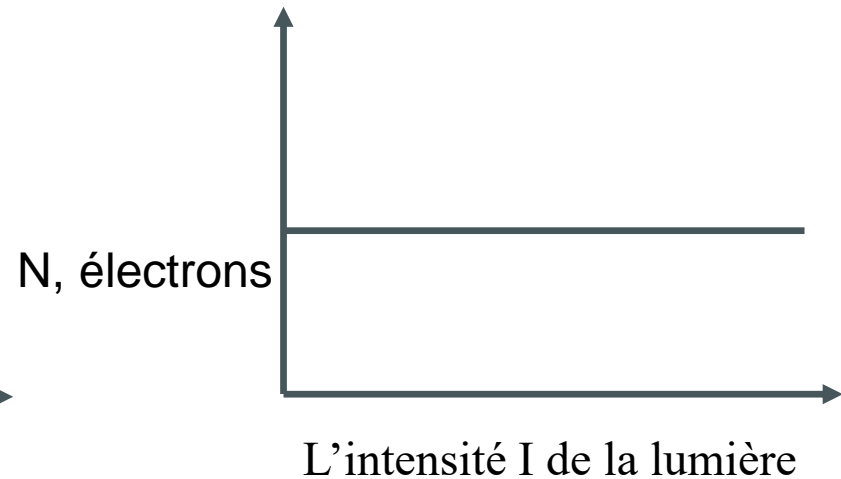


Traçant **le nombre d'électrons** éjectés en fonction de **l'intensité** de la lumière incidente.

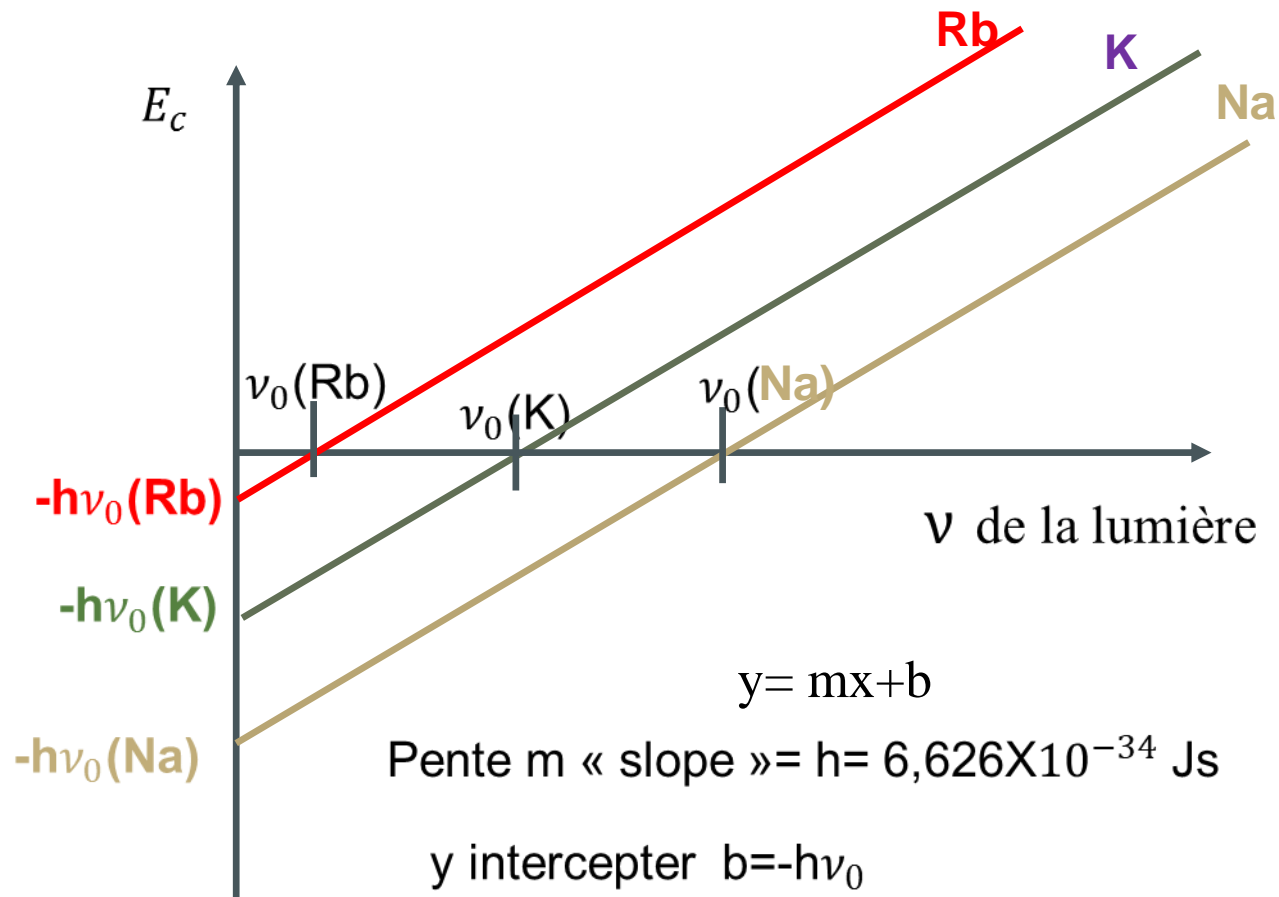
- Observé expérimentalement



- Prédit de la physique classique



Tracé de l'énergie cinétique en fonction de ν pour plusieurs métaux



Einstein pourrait réécrire l'équation de la droite:

l'énergie de la lumière est proportionnelle à sa fréquence

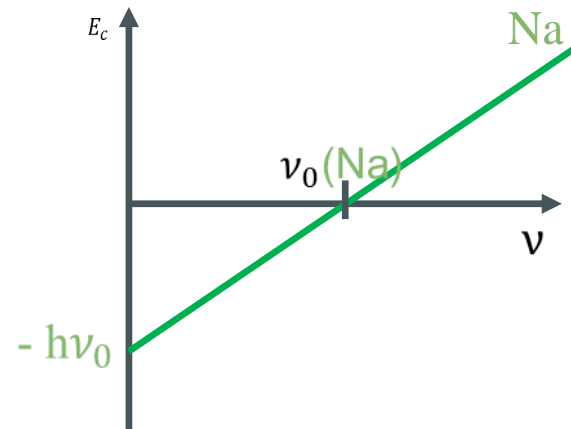
$$Y = mx + b$$

$$E_c = h\nu - h\nu_0$$

ν fréquence de la lumière incidente

$h\nu = E_i = L$ l'énergie de la lumière incidente

la lumière est composée de paquets d'énergie appelés photons



L'énergie cinétique

$$E_c = h\nu - h\nu_0$$

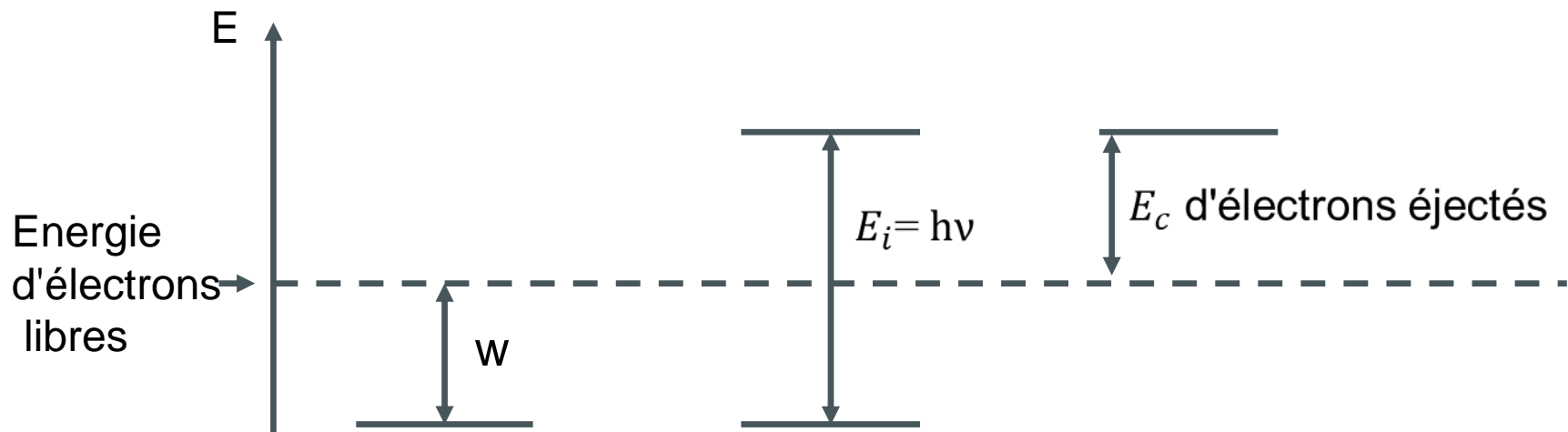


Einstein 1905

L'énergie de la lumière est proportionnelle à sa fréquence

$$E_c = h\nu \text{ (Js)(s}^{-1}\text{)} = \text{J}$$

Un nouveau modèle pour l'effet photoélectrique



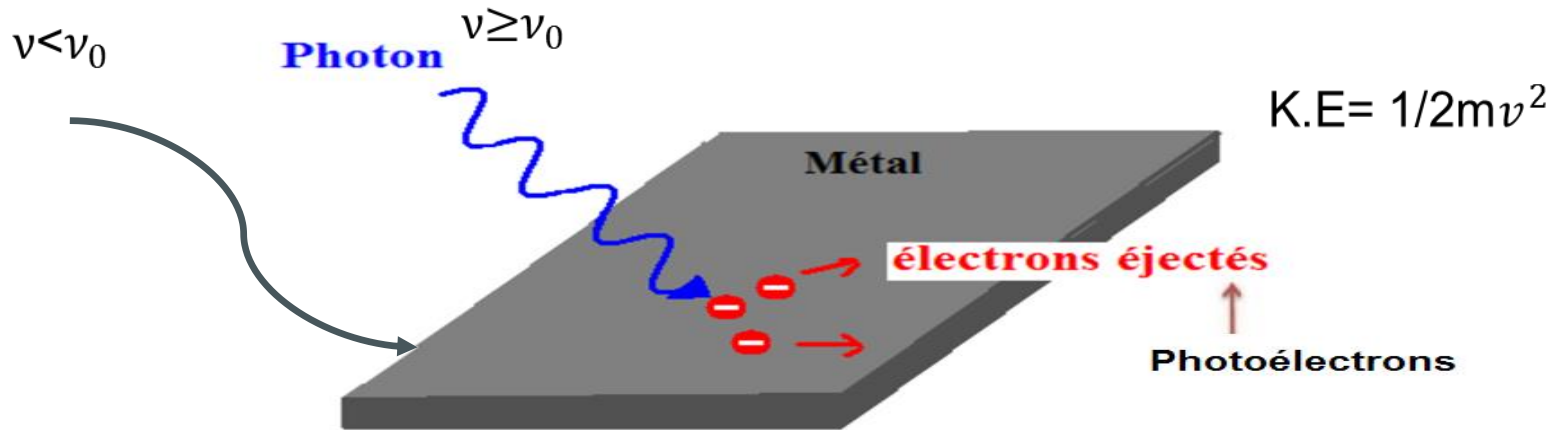
L'énergie d'un photon incidente $E_i \geq W$ fonction de travail du métal, afin d'éjecter un électron.

toute énergie restante est l'énergie cinétique.

$$E_i = E_c + W$$

L'Effet photoélectrique

Un faisceau de lumière **UV** frappant une surface métallique peut éjecter des électrons



$$E = h\nu = E_c + W$$

- Un **photoélectron** est un électron émis par **effet photoélectrique**.
- La fréquence minimum nécessaire pour produire des photoélectrons correspond au cas où $E_{max} = 0$. elle donnée par:

ν_0 : la fréquence de seuil

$$W_0 = h\nu_0$$

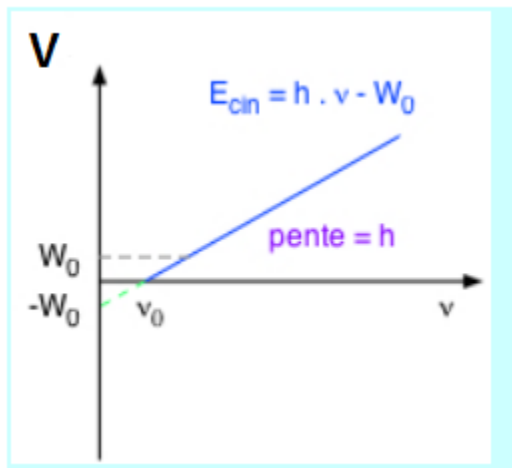
L'effet photoélectrique et Einstein

- En 1905, Albert Einstein met à profit les idées de quantification de l'énergie émises par Planck et réussit à expliquer l'effet photoélectrique, au cours duquel un métal exposé à la lumière éjecte des électrons. Pour une lumière monochromatique.
- **l'énergie cinétique** maximale des photoélectrons est *indépendante de l'intensité* lumineuse et ne dépend que de *la fréquence de l'onde incidente*. Pour chaque métal, il existe un seuil en fréquence, ν_0 au-dessous duquel aucun électron n'est émis et cela quelle que soit l'intensité de l'onde lumineuse.

L'interprétation de l'effet photoélectrique

- Les électrons d'un métal sont piégés dans un puits de potentiel. Il faut fournir une énergie **W** pour les extraire.
- $E = h\nu = E_c + W(h\nu_0)$
- $h\nu - h\nu_0 = E_c = eV$
- $V = \frac{h}{e}(\nu - \nu_0)$
- $h(\nu - \nu_0) = eV$
- Lorsqu'un photon est absorbé par la surface métallique, son énergie **hν** sert à extraire un électron et à lui communiquer une énergie cinétique **E_c**. Ceci se traduit par l'équation :

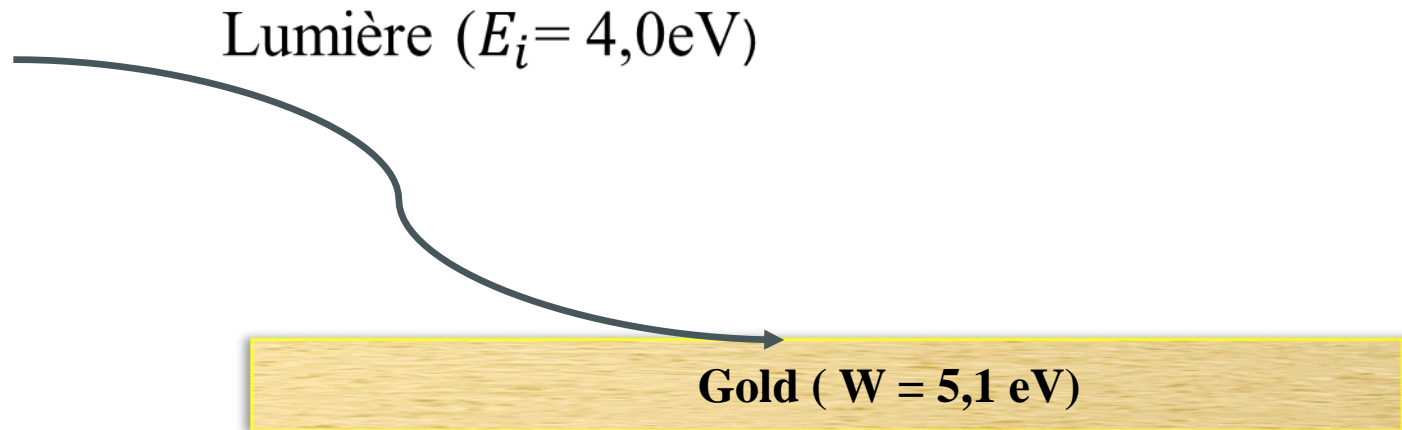
L'interprétation de l'effet photoélectrique



- On obtient une valeur de h qui coïncide exactement avec la constante de Planck.
- Le travail d'extraction (W) dépend de la **nature du métal** considéré. Il vaut par exemple **4,5 eV** pour le **tungstène**, mais seulement **1,8 eV** pour le **césium**.

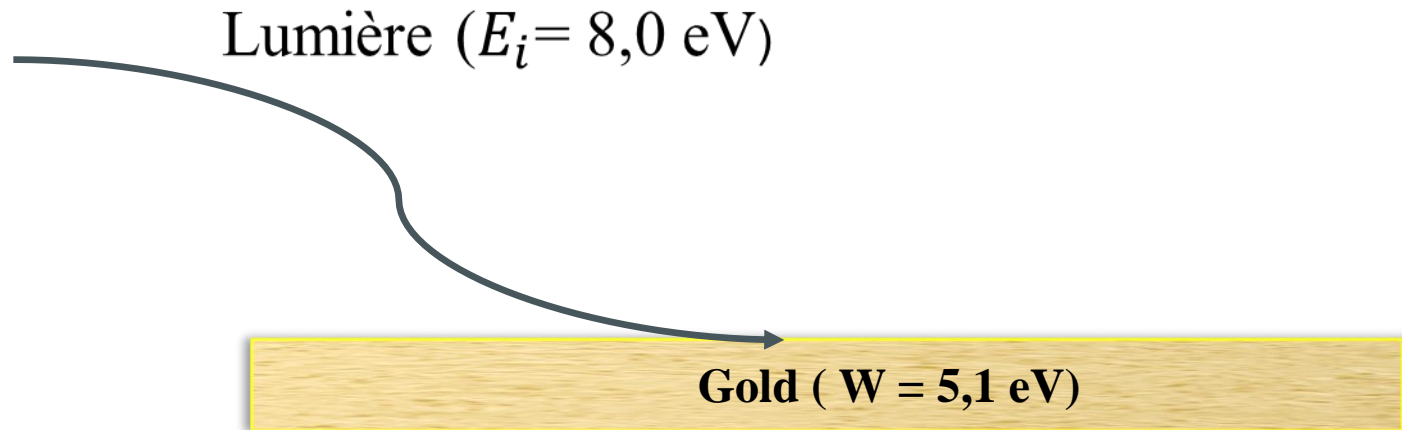
- Le travail d'extraction est l'énergie minimum qu'il faut fournir à l'électron pour l'arracher au métal.

Si un faisceau de lumière avec une énergie = 4.0 eV ($1\text{eV}=1,6\times 10^{-19}\text{J}$) frappe une surface d'or, quelle est l'énergie cinétique maximale des électrons éjectés?



1. $E_c = 9.1\text{ eV}$
2. $E_c = 5.1\text{ eV}$
3. $E_c = 1.1\text{ eV}$
4. $E_c = 4.0\text{ eV}$
5. Aucun électron ne sera éjecté

Si un faisceau de lumière avec une énergie = 8.0 eV
(1eV=1,6x10⁻¹⁹J) frappe une surface d'or, quelle est l'énergie
cinétique maximale des électrons éjectés?



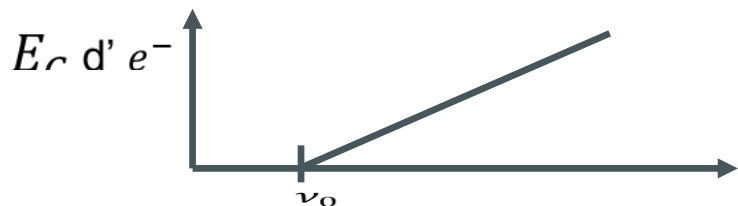
1. $E_c = 13.1 \text{ eV}$
2. $E_c = 2.29 \text{ eV}$
3. $E_c = 8.0 \text{ eV}$
4. $E_c = 5.1 \text{ eV}$
5. Aucun électron ne sera éjecté

Applications

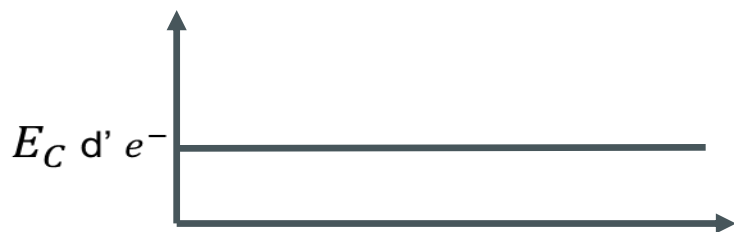
- Il est utilisé dans de nombreux instruments :
- Les cellules des panneaux solaires par exemple, fonctionnent avec l'effet photo-électrique, les dispositifs de commande tels que la mise en marche d'un escalier roulant, l'ouverture automatique d'une porte, le déclenchement d'un système d'alarme....
- Les photodiodes qui peuvent être utilisées, par exemple d'une télécommande de télévision....



▪ Observé expérimentalement



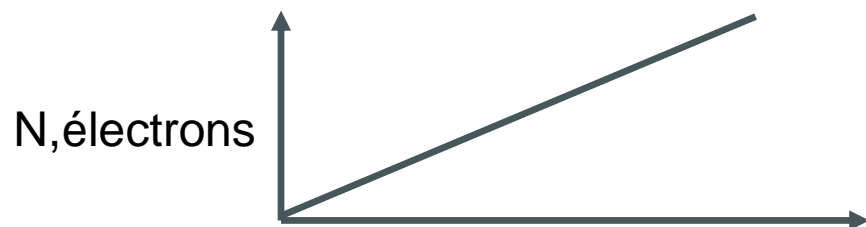
▪ Prédit de la physique classique



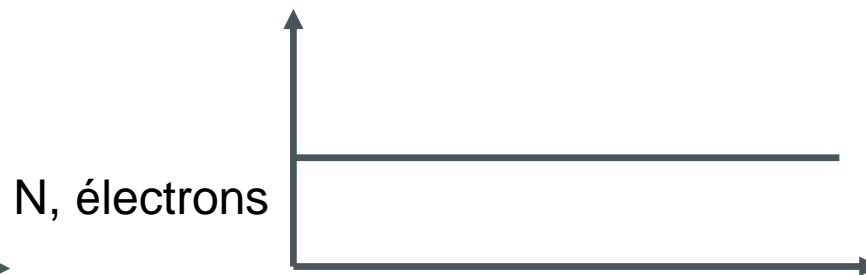
L'intensité I de lumière



L'intensité I de lumière



L'intensité I de la lumière

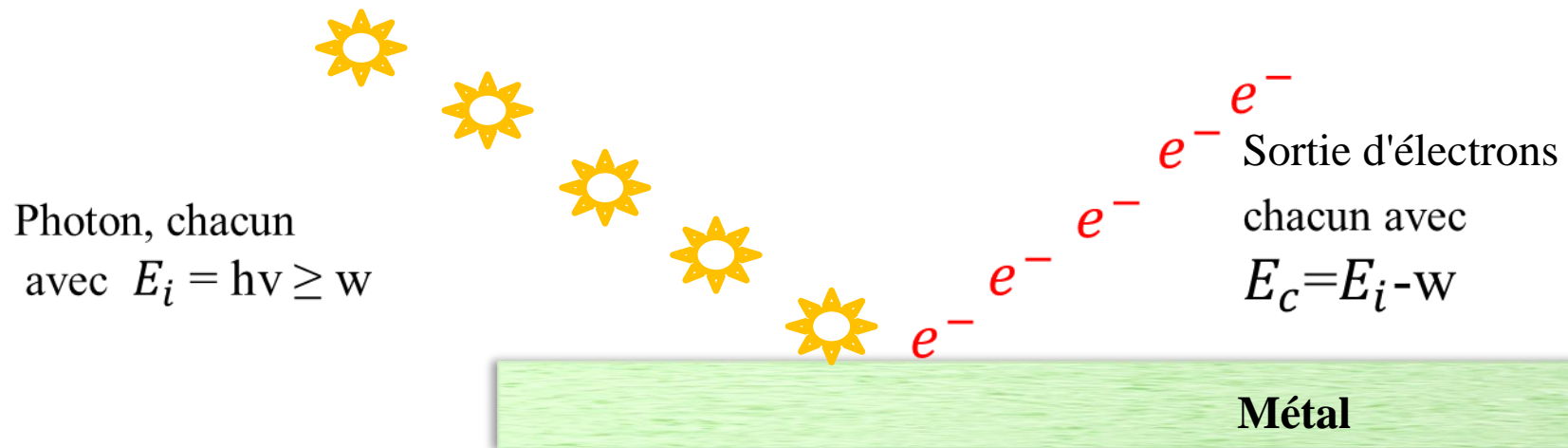


L'intensité I de la lumière

- Au dessus de ν_0
- Augmente ν
- Augmente E_C

▪ $E_i = E_C + W = E_C = h\nu - h\nu_0$

Le **nombre d'électrons** éjectés de la surface d'un métal est proportionnel au **nombre de photons** absorbés par le métal.



- Ainsi, **l'intensité** de la lumière est proportionnelle au **nombre de photons** absorbés et au **nombre d'électrons** émis.
- Unité de l'intensité = Watt (W) = J/s.

- **L'énergie cinétique** ne change pas car une **intensité** élevée signifie plus de **photons / sec** et pas plus **d'énergie / photon**.
- Le **nombre d'électrons** émis change car une intensité élevée signifie plus de **photons**.
- Pour expliquer les données observées:
- la lumière est constituée de paquets discrets appelés **photons** (elle est quantifiée).
- l'énergie d'un photon est proportionnelle à sa fréquence ($E = h\nu$).
- Intensité de la lumière = photons par seconde.

Exemple.1

- **Exercice 1.** Une cellule photoélectrique a une cathode recouverte de césium. Le travail d'extraction d'un électron du césium est de 1.9 eV.
- On éclaire cette cathode par 2 radiations électromagnétique 1 et 2 de longueurs d'onde $\lambda_1 = 750 \text{ nm}$ et $\lambda_2 = 540 \text{ nm}$. Quelle radiation permettra l'effet photoélectrique? justifier

Effet Compton

- *Le rayonnement du corps noir* montre que l'énergie d'une onde électromagnétique de fréquence ν est quantifiée.
- *L'effet photoélectrique* indique que, lors de l'interaction avec la matière, l'onde peut se comporter comme un faisceau de photons d'énergie $h\nu$.
- L'effet Compton complète cette description corpusculaire en montrant qu'un photon a non seulement une énergie, mais une impulsion p donnée par la relation:
$$P = \hbar k$$
 - \hbar la constante de Planck divisée par 2π ($\hbar = \frac{h}{2\pi}$).
 - k le vecteur d'onde associé à l'onde électromagnétique.



A. Compton (1892-1962)

Comportement ondulatoire des corpuscules

- **Louis de Broglie** en 1924 postule le caractère ondulatoire des particules d'impulsions \mathbf{p} . Il supposait alors qu'une onde peut être associée à chaque particule. sa longueur d'onde est donnée par la relation:

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

Longueur d'onde
(de de Broglie)
Attribut
(Ondulatoire)

Impulsion
Attribut
(Corpusculaire)

Références

<http://www-igm.univ-mlv.fr/~dr/XPOSE2003/Quantique/Dualite%20onde-corpuscule.htm>

<https://ocw.mit.edu/courses/chemistry/5-111sc-principles-of-chemical-science-fall-2014/>

Lecture 3: Wave-particle Duality of Light