

Rappel

A la fin du 19^{ème} siècle on découvre que les théories classiques de la mécanique et de l'électromagnétisme ne peuvent pas expliquer certains phénomènes observés en laboratoire, et mènent à des contradictions

Le modèle planétaire de l'atome, selon les lois classiques, prévoit que l'électron perd de l'énergie sous forme de rayonnement, et collapse sur le noyau en moins que une nanoseconde. **La physique classique ne peut pas expliquer la stabilité de la matière.**

La description classique du spectre de rayonnement d'un corps à une température donnée – appelé corps noir – conduit à la loi de Rayleigh-Jeans. Cette loi prévoit une **divergence de l'intensité émise a petites longueurs d'onde**. C'est la **catastrophe ultraviolette**.

La théorie développée par Max Planck en 1900 permet d'expliquer tous les résultats des expériences et résout le problème de la catastrophe ultraviolette.

La théorie de Planck fait l'hypothèse que **les atomes du corps noir ne peuvent être que dans des états dont les énergies sont distribuées sur des valeurs discrètes**. Le rayonnement est absorbé et émis par les atomes qui font des transitions entre états. **Le rayonnement est donc produit par unités d'énergie discrète, qu'on appelle «quanta»**.

L'idée de la quantification de l'énergie des atomes et du rayonnement nous oblige à revoir les lois fondamentales de la matière et de la lumière.

Cours 02

L'effet photoélectrique

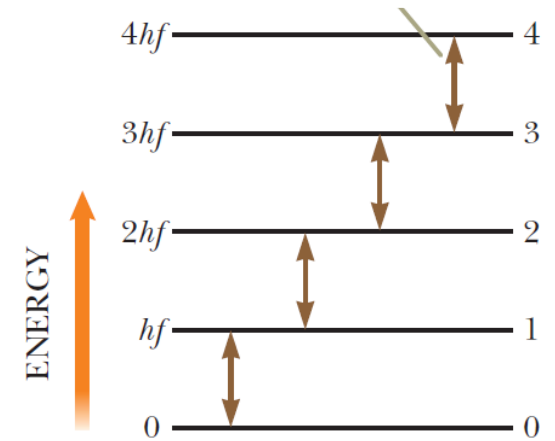
La théorie du photon de Einstein

L'effet Compton et la nature corpusculaire de la lumière

Nature de la quantification de l'énergie

La théorie du corps noir de Planck suggère que:

1. L'énergie des «oscillateurs» (c.-à-d. des atomes) du corps noir est quantifiée

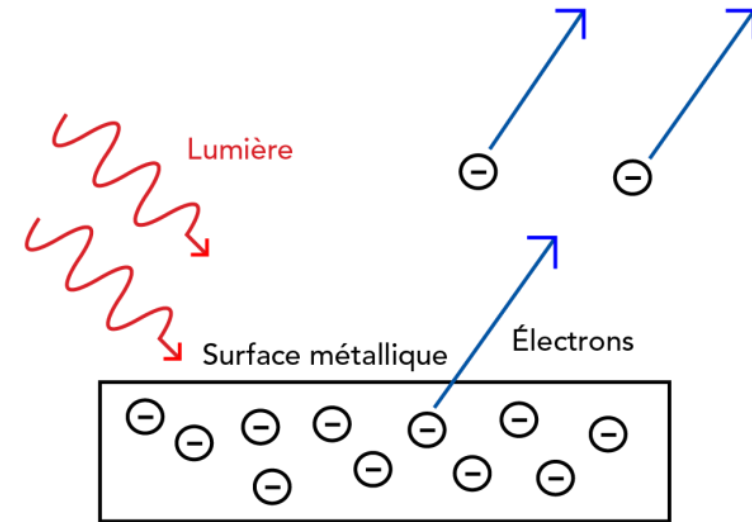


2. Le rayonnement du corps noir à chaque fréquence est émis par quanta d'énergie

$$E_n = nhf \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

La question fondamentale qui reste ouverte est: (2.) est-il seulement conséquence de (1.)? Autrement dit, peut-on avoir de la lumière de fréquence f et d'énergie autre que $E_n = nhf$? Ou bien la quantification de l'énergie est une propriété fondamentale de la lumière, indépendamment du mécanisme d'émission?

L'effet photoélectrique



Les observations expérimentales sur l'effet photoélectrique étaient en désaccord avec la théorie basée sur les lois de la physique classique.

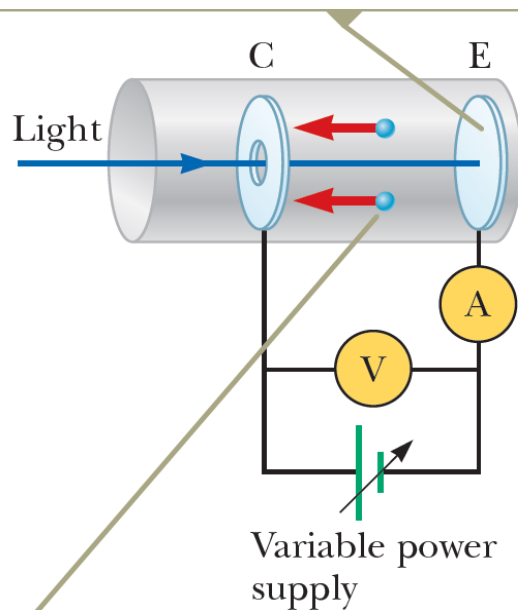
Einstein en 1905 développe une théorie de l'effet photoélectrique basée sur **l'hypothèse que la lumière est composée de quanta d'énergie**. La théorie de Einstein permet d'expliquer toutes les observations.

Le succès de l'hypothèse des quantas dans l'explication de l'effet photoélectrique est **la preuve que la quantification de l'énergie est une propriété fondamentale de la lumière**.

Les quantas d'énergie de la lumière seront appelés «**photons**» pour la première fois en 1926.

Mesure de l'effet photoélectrique

Quand la lumière arrive sur l'émetteur, elle arrache des électrons



Quand les électrons arrivent sur le collecteur, ils produisent un courant dans le circuit

Un tube vide contient deux plaques métalliques, un émetteur E et un collecteur C. Une différence de potentiel est générée entre les deux plaques par un circuit alimenté.

Les électrons émis par E comme conséquence de la lumière incidente **sont accélérés par la différence de potentiel**. Une partie des électrons atteint le collecteur et produit un courant.

Pour une tension très élevée, tous les électrons émis sont attirés par le collecteur et le courant atteint une valeur limite pour une intensité de lumière donnée.

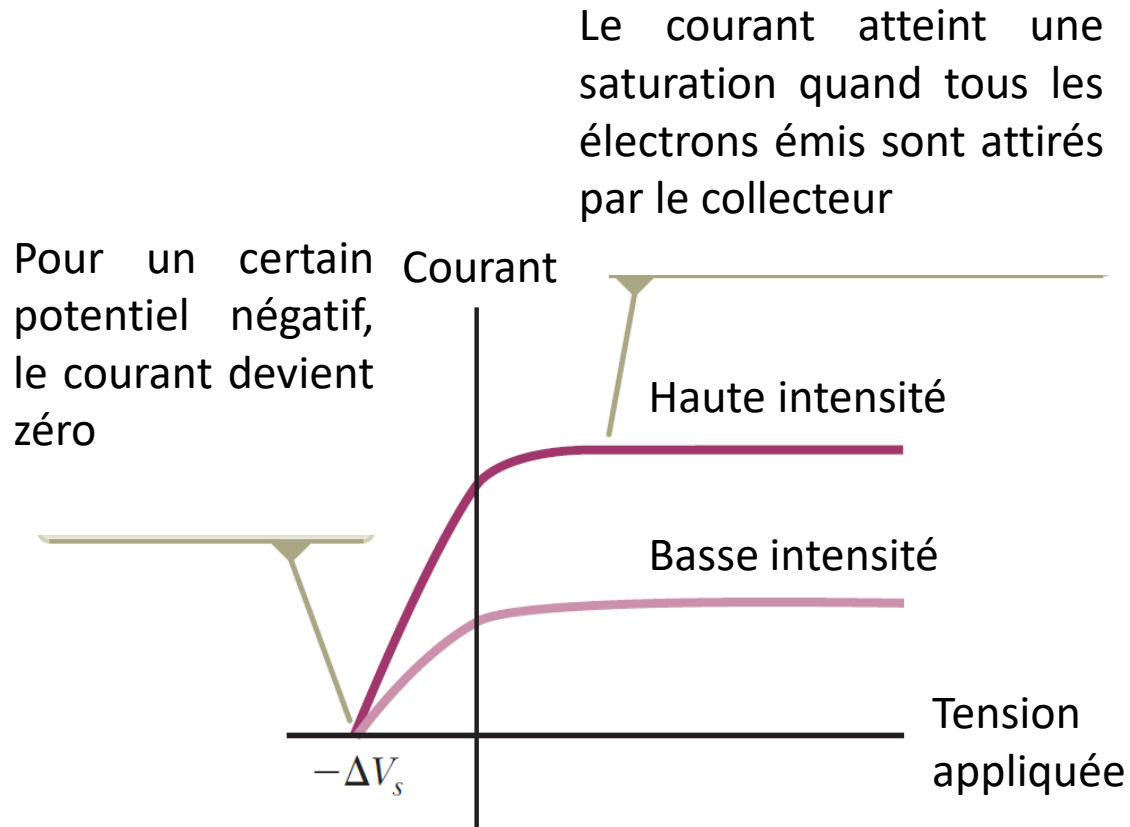
Si on applique une différence de potentiel négative, on ralentit les électrons. **Si on les ralentit de façon à les arrêter juste avant qu'ils atteignent le collecteur, le courant mesuré sera zéro.**

Dans cette condition, **la différence de potentiel ΔV_s correspond exactement à l'énergie cinétique des électrons émis** (appelée K_{max} sur le livre).

$$K_{max} = e\Delta V_s$$

Cette valeur mesurée **ne dépend pas de l'intensité de la lumière**

Mesure de l'effet photoélectrique



Un tube vide contient deux plaques métalliques, un émetteur E et un collecteur C. Une différence de potentiel est générée entre les deux plaques par un circuit alimenté.

Les électrons émis par E comme conséquence de la lumière incidente **sont accélérés par la différence de potentiel**. Une partie des électrons atteint le collecteur et produit un courant.

Pour une tension très élevée, tous les électrons émis sont attirés par le collecteur et le courant atteint une valeur limite pour une intensité de lumière donnée.

Si on applique une différence de potentiel négative, on ralentit les électrons. **Si on les ralentit de façon à les arrêter juste avant qu'ils atteignent le collecteur, le courant mesuré sera zéro.**

Dans cette condition, **la différence de potentiel ΔV_s correspond exactement à l'énergie cinétique des électrons émis** (appelée K_{max} sur le livre).

$$K_{max} = e\Delta V_s$$

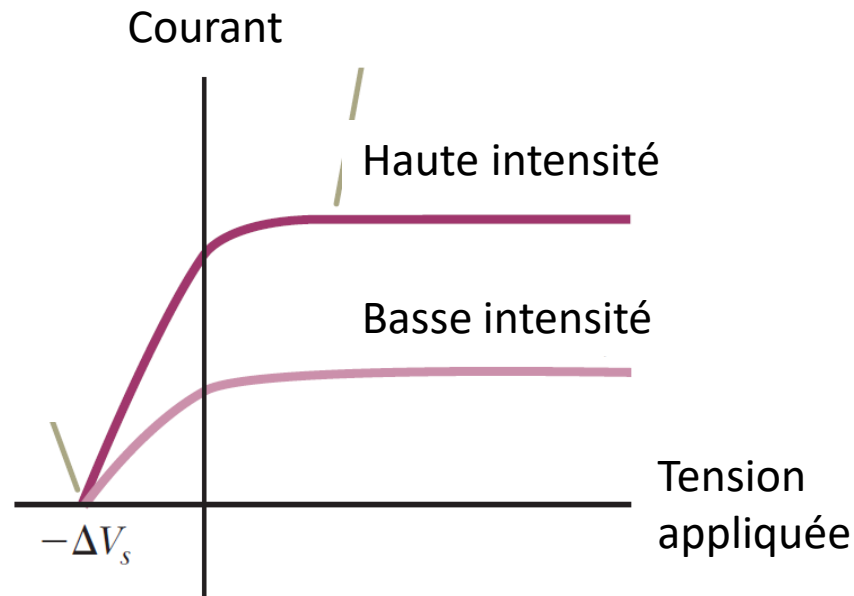
Cette valeur mesurée **ne dépend pas de l'intensité de la lumière**

Caractéristiques observées dans l'expérience

1. Comment l'énergie cinétique des électrons émis par le métal dépend-elle de l'intensité de la lumière?

Ce que prévoit la physique classique: Les électrons devraient absorber de l'énergie de façon continue, comme pour un oscillateur harmonique forcé (vu en physique générale. Pensez par exemple à une balançoire poussée à chaque oscillation). Si on augmente l'intensité de la lumière, l'énergie est absorbée plus rapidement par les électrons, qui devraient être émis avec une plus grande énergie cinétique.

Ce qu'on observe dans l'expérience: L'énergie cinétique maximale des électrons émis ne dépend pas de l'intensité de la lumière.



Caractéristiques observées dans l'expérience

2. Quel est le délai entre l'arrivée de la lumière sur le métal et l'émission d'électrons?

Ce que prévoit la physique classique: Pour une petite intensité de lumière il devrait avoir un délai. Puisque à basse intensité l'énergie est absorbée lentement par l'électron, il va falloir plus longtemps pour qu'il acquière suffisamment d'énergie pour être arraché des atomes du métal.

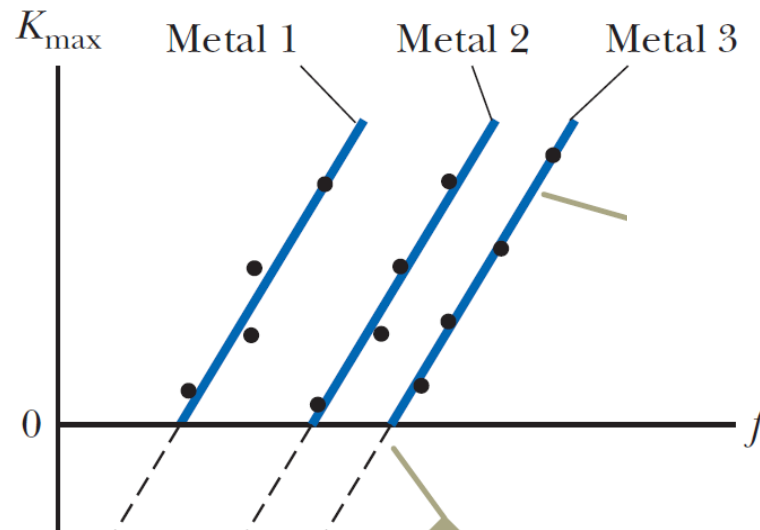
Ce qu'on observe dans l'expérience: Les électrons sont émis instantanément à l'arrivée de la lumière, indépendamment de son intensité.

Caractéristiques observées dans l'expérience

3. Comment l'émission d'électrons dépend-elle de la fréquence de la lumière?

Ce que prévoit la physique classique: Les électrons devraient être arrachés du métal pour toute fréquence de la lumière, à condition que l'intensité soit suffisamment élevée. Pensez à l'oscillateur forcé. Si la fréquence du terme forçant est très différente de la fréquence de l'oscillateur, le transfert d'énergie sera moins efficace, mais toujours présent.

Ce qu'on observe dans l'expérience: On observe qu'il existe une fréquence de seuil f_c . Cette fréquence est caractéristique du type de métal utilisé. Si la fréquence de la lumière est plus petite de la fréquence de seuil, aucun électron n'est émis, et ceci indépendamment de l'intensité de la lumière.

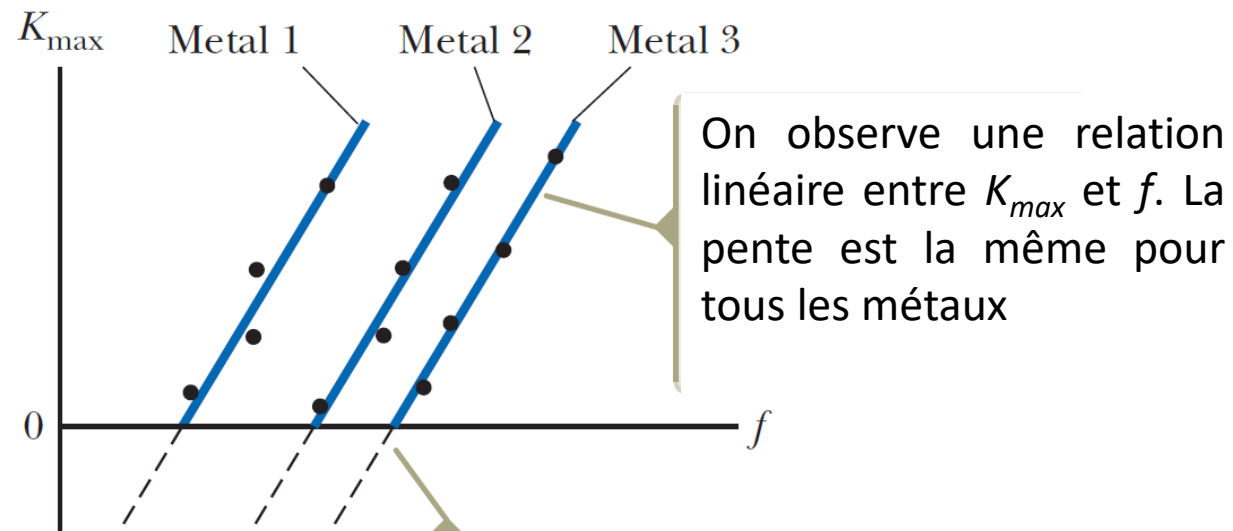


Caractéristiques observées dans l'expérience

4. Comment l'énergie cinétique des électrons émis dépend-elle de la fréquence de la lumière?

Ce que prévoit la physique classique: Il ne devrait pas y avoir de lien entre la fréquence de la lumière et l'énergie des électrons émis. A chaque fréquence, l'énergie des électrons émis devrait dépendre de l'intensité de la lumière.

Ce qu'on observe dans l'expérience: L'énergie cinétique des électrons émis augmente linéairement avec la fréquence de la lumière.



Théorie de Einstein

La lumière est faite de quanta d'énergie, appelés photons. Pour la lumière avec fréquence f , chaque photon a une énergie $E=hf$.

Quand la lumière arrive sur le métal, chaque photon qui est absorbé donne toute son énergie à un électron.

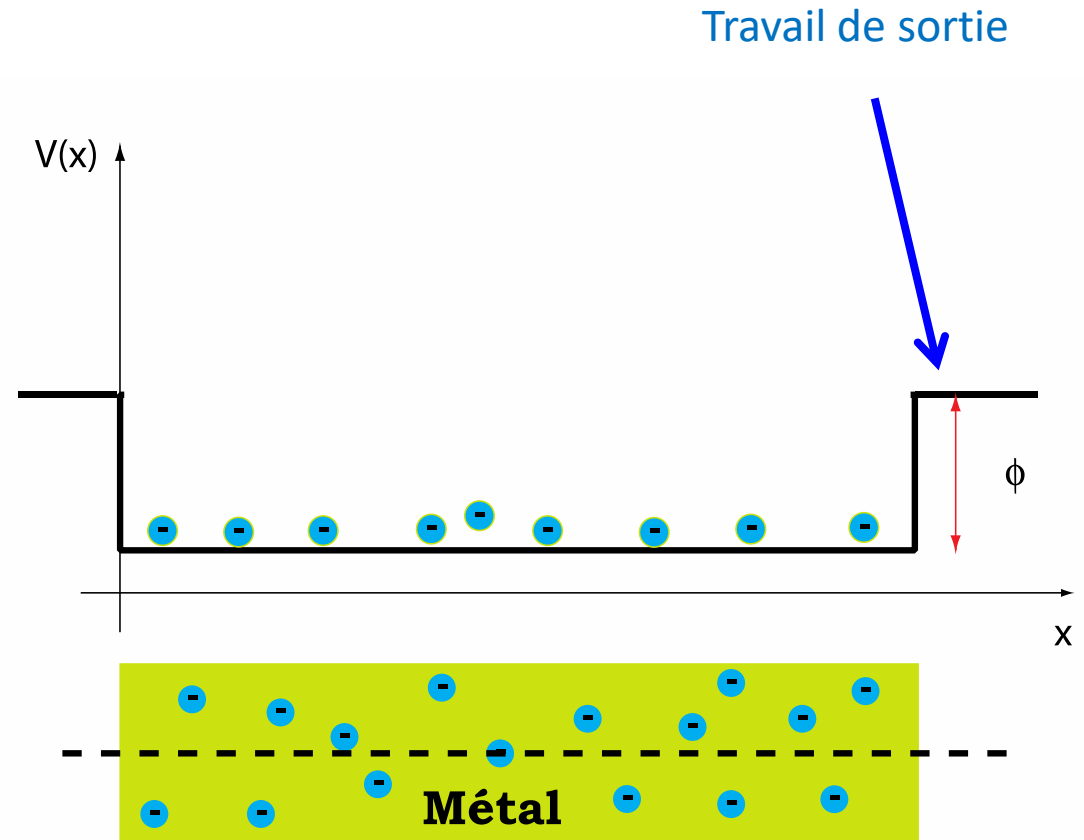
Un électron est émis comme conséquence de l'absorption d'un photon (les effets à 2 ou plusieurs photons sont rares).

L'énergie cinétique d'un électron arraché du métal est donc

$$K_{\max} + \phi = hf$$

$$K_{\max} = hf - \phi$$

Où ϕ est le **travail de sortie**, c.-à-d. l'énergie minimale requise pour arracher l'électron. Le travail de sortie est une propriété définie pour chaque matériau.



Ce que prévoit la théorie de Einstein

1. Comment l'énergie cinétique des électrons émis par le métal dépend-elle de l'intensité de la lumière?

Clairement, l'énergie cinétique $K_{max}=hf-\phi$ ne dépend pas de l'intensité de la lumière. Elle ne dépend que de la fréquence de la lumière et du travail de sortie du métal. Si on augmente l'intensité de la lumière, on augmente le nombre de photons par unité de temps, ce qui va changer le nombre d'électrons par unité de temps qui sont émis, mais chaque électron sera émis avec la même énergie cinétique.

2. Quel est le délai entre l'arrivée de la lumière sur le métal et l'émission d'électrons?

Dès que les photons arrivent sur le métal, il y en aura certains qui vont céder leur énergie à un électron. Donc il y aura de l'émission d'électrons sans délai.

3. Comment l'émission d'électrons dépend-elle de la fréquence de la lumière?

Le photon doit avoir au moins énergie ϕ pour arracher un électron. C'est pourquoi pour des photons d'énergie plus basse on n'observe aucune émission d'électrons.

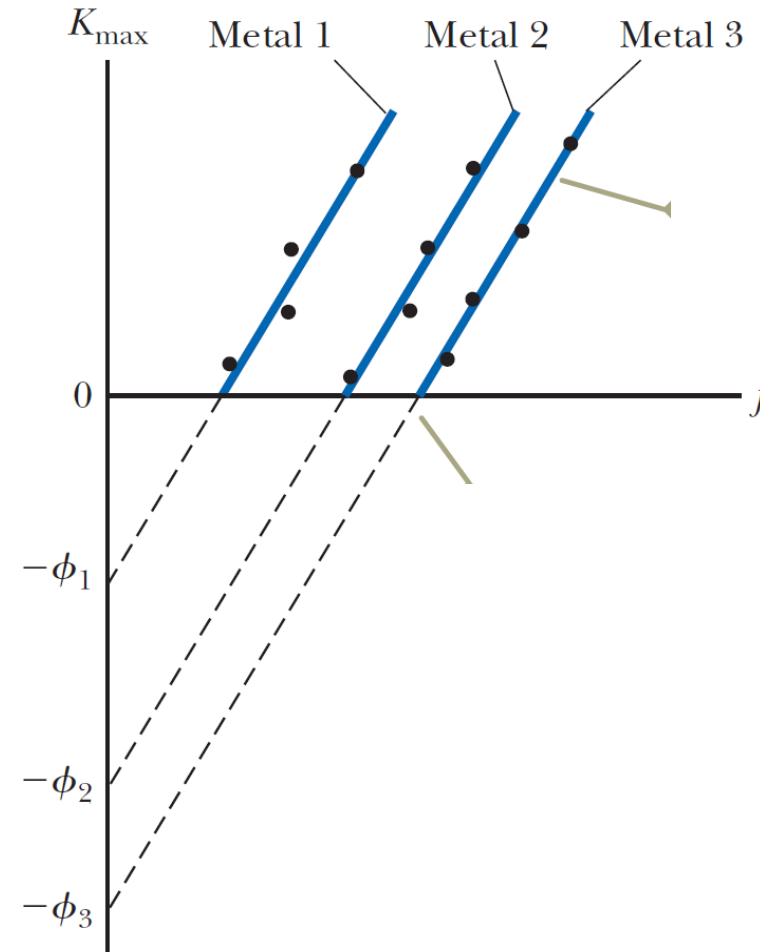
4. Comment l'énergie cinétique des électrons émis dépend-elle de la fréquence de la lumière?

Un photon de fréquence plus élevée a une plus grande énergie et cède donc une plus grande énergie cinétique à l'électron émis.

Ce que prévoit la théorie de Einstein

$$K_{\max} = hf - \phi$$

La comparaison entre la théorie et les mesures permet de déterminer la valeur du travail de sortie pour des différents métaux.



Importance de l'effet photoélectrique dans le développement de la physique quantique

Les études sur l'effet photoélectrique au début du 20^{ème} siècle ont joué un rôle fondamental dans le développement de la physique quantique.

La théorie de Einstein indique clairement que **la quantification de l'énergie est une propriété fondamentale de la lumière** (car dans l'effet photoélectrique on observe la quantification indépendamment de comment la lumière est produite pour effectuer l'expérience).

On commence ainsi à avancer l'hypothèse que les quantas d'énergie de la lumière puissent être des particules. C'est **l'hypothèse corpusculaire de la lumière**.

En parallèle aux études sur la lumière, d'autres études (qu'on verra plus loin) suggéraient que les particules élémentaires qui composent la matière puissent se comporter comme des ondes dans certaines situations. C'est **l'hypothèse ondulatoire de la matière**.

Les deux hypothèses forment un principe fondamental pour la physique quantique, énoncé par Niels Bohr. C'est **le principe de complémentarité**.

La preuve expérimentale que le photon se comporte comme une particule arriva en 1923 avec l'expérience sur l'effet Compton.

Applications de l'effet photoélectrique

Le tube photomultiplicateur permet de détecter très peu de photons, à la limite même un photon à la fois.

Un photon absorbé par la photocathode produit un électron qui est accéléré par la différence de potentiel dans le premier stade.

Après avoir ainsi acquis de l'énergie cinétique, il arrive sur un «dynode» où il arrache plusieurs électrons par collision.

L'effet se répète plusieurs fois, jusqu'à produire un courant macroscopique à la sortie, même avec un seul photon en entrée.

Le photomultiplicateur est utilisé partout où il faut détecter très peu de photons, par exemple en astronomie, en physique des particules, etc.

Aujourd'hui, avec le progrès de l'électronique, on remplace de plus en plus les photomultiplicateurs par des *charge-coupled devices* (CCD)

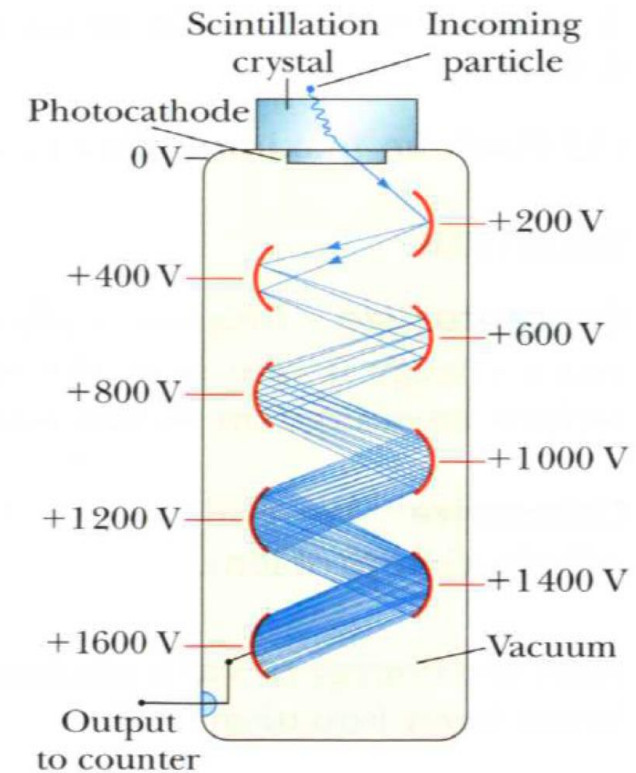
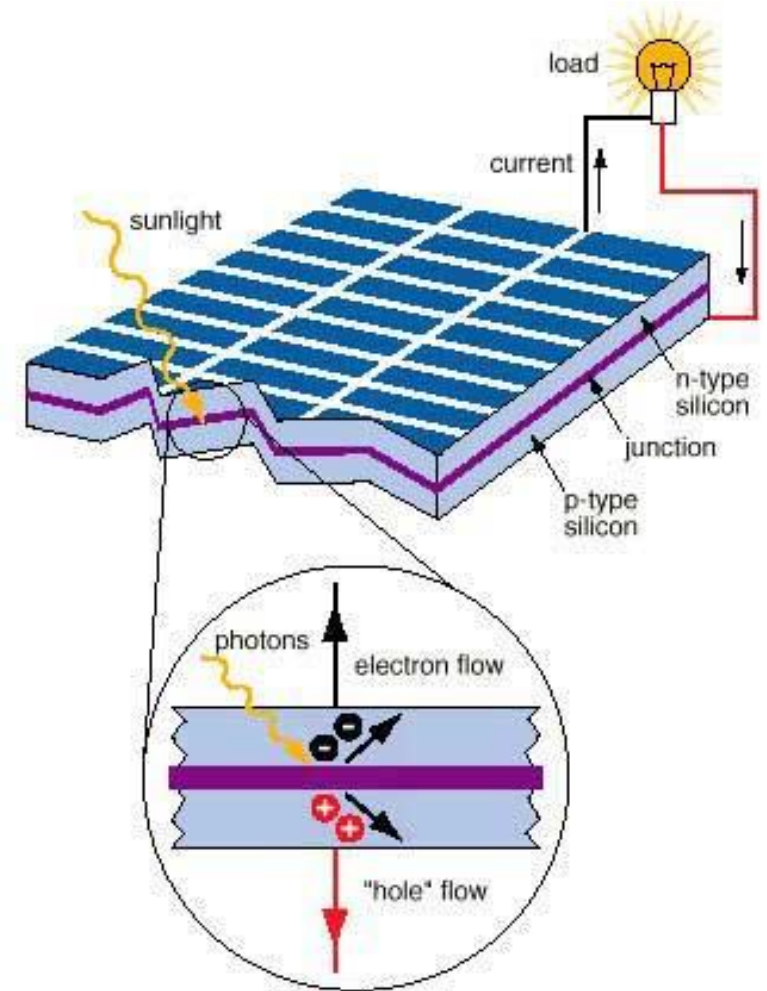


Figure 40.12 The multiplication of electrons in a photomultiplier tube.

Applications de l'effet photoélectrique

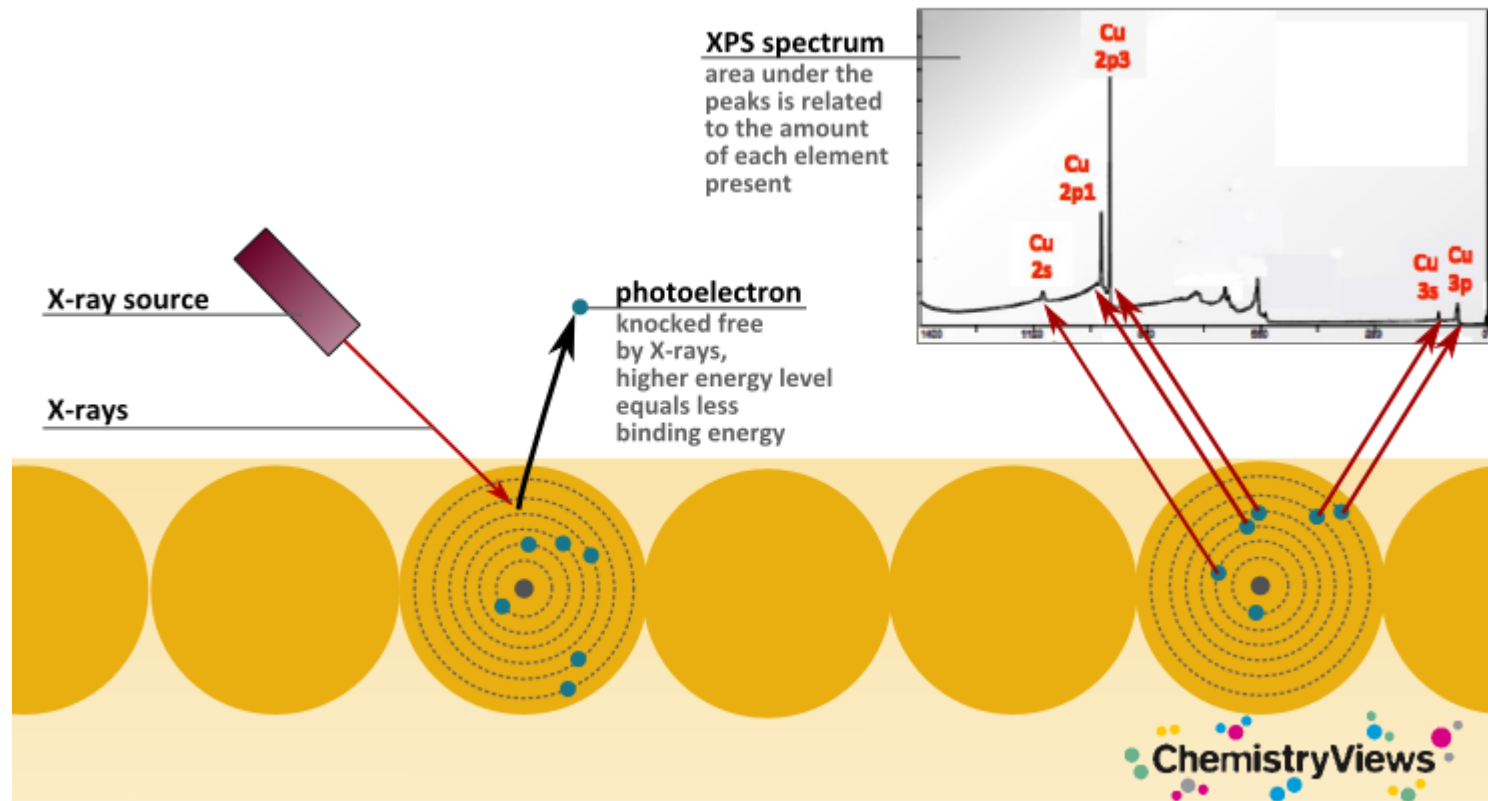
La **cellule photovoltaïque** est le composant de base des panneaux solaires photovoltaïques pour la production d'énergie électrique.

Dans une jonction à semi-conducteur, le photon arrache un électron de la bande de valence (en créant un «trou»). L'électron et le trou s'éloignent de la jonction et finissent par générer un courant électrique.



Applications de l'effet photoélectrique

Spectrométrie photoélectronique X (XPS). On peut mesurer avec précision l'énergie de électrons émis, ainsi que le flux d'électrons pour chaque énergie, et utiliser cette donnée pour extraire des informations sur les matériaux. En particulier, la technique XPS arrache les électrons les plus fortement liés aux atomes. Elle donne donc des informations sur les éléments chimiques qui composent la matière qui est analysée.



Questions ouvertes

L'effet photoélectrique a permis de conclure que **le rayonnement électromagnétique est distribué par quanta d'énergie**.

Einstein a déjà l'intuition que **ces quantas sont des vraies particules élémentaires**, mais il faut le prouver.

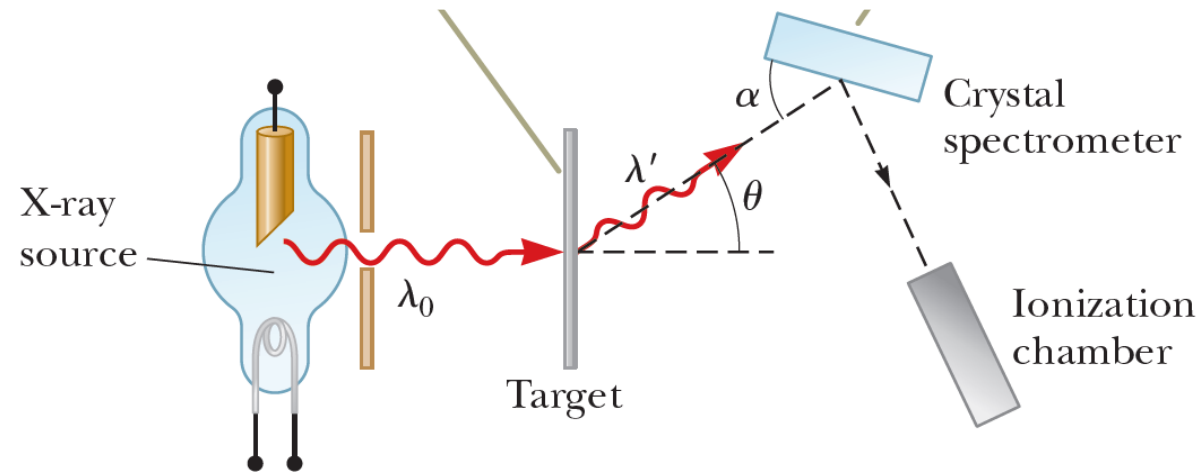
La preuve sera donnée par l'expérience sur **l'effet Compton**, que nous verrons par la suite.

Si les ondes électromagnétiques peuvent se comporter comme des particules, **est-il possible que les particules élémentaires se comportent aussi comme des ondes** sous certaines conditions?

L'effet Compton (1922)

L'effet Compton est observé dans les expériences de diffusion de la lumière sur des particules chargées, en particulier des électrons.

On observe que la longueur d'onde de la lumière diffusée est différente de celle de la lumière incidente, mais dépend de l'angle de la diffusion. Pour chaque valeur de l'angle, une seule longueur d'onde est observée



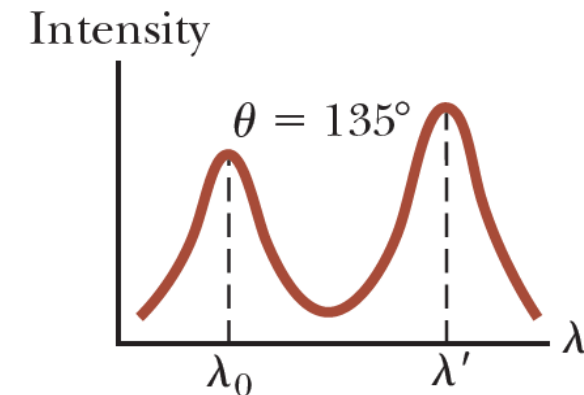
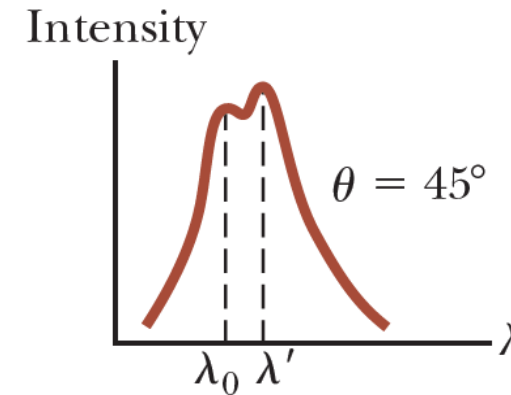
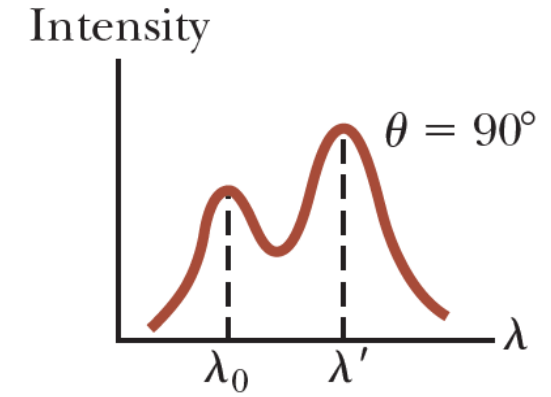
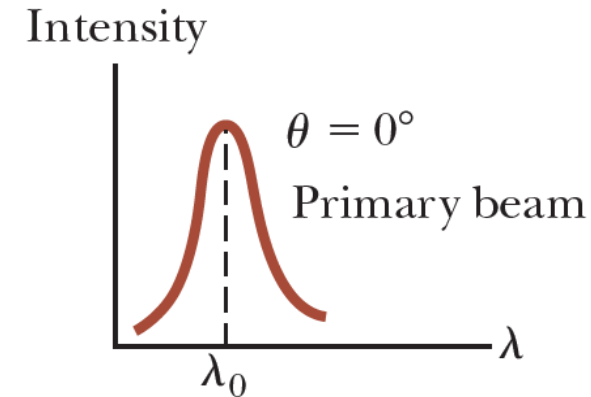
L'effet Compton : ce qu'on observe

Dans la théorie classique, l'onde électromagnétique met l'électron en mouvement oscillatoire.

L'électron qui oscille émet à son tour une onde électromagnétique, dont on peut prévoir la longueur d'onde en utilisant les équations de Maxwell.

Dans la théorie classique, le changement de longueur d'onde est produit par l'effet Doppler si l'électron est déjà en mouvement dans le référentiel du laboratoire. En particulier, si l'électron est au repos, la diffusion est résonnante et aucun changement de longueur d'onde devrait être observé.

Dans l'expérience par contre on observe, pour chaque angle de diffusion, un maximum de l'intensité diffusée à une longueur d'onde bien définie.



La théorie corpusculaire de l'effet Compton

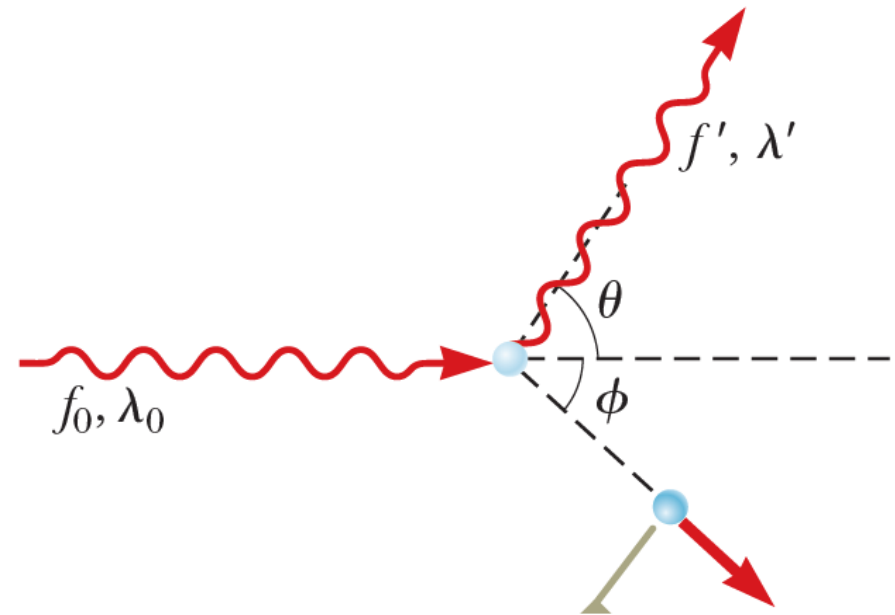
Selon l'hypothèse corpusculaire de la lumière, les photons sont des particules. Ils doivent donc effectuer une collision élastique avec les électrons, **avec conservation d'énergie et de quantité de mouvement.**

Le calcul donne un résultat simple et **en parfait accord avec l'expérience.**

$$\lambda' - \lambda_0 = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos \theta)$$

La constante $h/m_e c$ a les dimensions d'une longueur et est appelée la **longueur d'onde Compton de l'électron**. Elle vaut

$$\lambda_c = \frac{h}{m_e c} = 0.00243 \text{ nm}$$



Questions ouvertes

L'effet Compton est la preuve que les photons se comportent comme des particules. Un phénomène qu'on est habitués à considérer comme ondulatoire, se manifeste sous forme corpusculaire.

Si les ondes électromagnétiques peuvent se comporter comme des particules, **est-il possible que les particules élémentaires se comportent aussi comme des ondes** sous certaines conditions?

Cette question, initialement formulée par Albert Einstein et par Louis de Broglie, trouvera une réponse définitive en 1927 avec **l'expérience de Davisson-Germer**, qu'on verra par la suite.

Quelles sont ces conditions qui déterminent le comportement corpusculaire ou ondulatoire? Autrement dit, comment peut-on savoir si un objet – que ce soit lumière ou matière – va se comporter comme une onde ou comme une particule? Ce sera Niels Bohr à introduire le **principe de complémentarité**, qui affirme que **ces deux types de comportement sont mutuellement exclusifs**. A suivre...