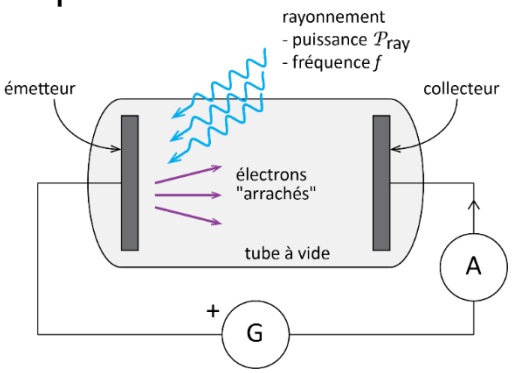
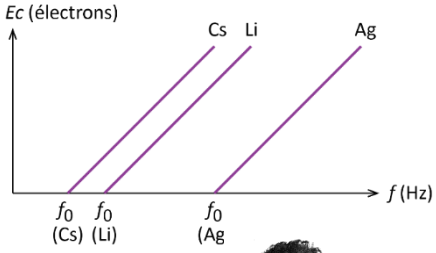
Modèle quantique de la lumière : le photon

Description de l'effet photoélectrique



- Un métal dit « émetteur » est éclairé avec un rayonnement de puissance $\mathcal{P}_{\text{ray}}$ et de fréquence f ;
- S'ils reçoivent une énergie suffisante, **des électrons de ce métal sont arrachés** à leurs atomes d'origine et rejoignent le collecteur.
- Pour une fréquence donnée, l'énergie cinétique des électrons est indépendante de la puissance du rayonnement incident :
- Pour une puissance incidente donnée :
  - → il existe une fréquence f_0 en-dessous de laquelle aucun électron n'est émis ; cette fréquence dépend du métal constituant l'émetteur ;
  - → pour les fréquences supérieures à f_0 : l'énergie cinétique augmente comme une fonction affine de f, dont le coefficient directeur est le même quel que soit le métal :



Ces faits expérimentaux sont en contradiction avec ce que prévoit la physique classique mais sont expliqué par le modèle quantique de la lumière

Le modèle quantique de la lumière selon EINSTEIN



- L'énergie transportée par un rayonnement est quantifiée. Le quantum d'énergie rayonnée est, par définition, indivisible et s'appelle **le photon**.
- Chaque photon a une énergie proportionnelle à sa fréquence donnée par la loi de Planck-Einstein : $E_{\text{photon}} = h \times f = \frac{hc}{\lambda}$
  - → E_{photon} : énergie du photon en J ;
  - → f : fréquence du rayonnement en Hz ;
  - → $h = 6{,}62607015 \times 10^{-34}$ J · s : constante fondamentale de Planck.
  - → λ étant la longueur d'onde en m ;
  - → $c = 299\,792\,458$ m · s^{-1} : célérité des ondes électromagnétiques dans le vide.

Explication de l'effet photoélectrique par Einstein

Pour rompre la liaison entre un électron et le noyau atomique, il faut fournir à cet électron une énergie appelée **travail d'extraction** W_{ex}. Cette énergie peut être apportée par un photon.

Définition : Le travail d'extraction W_{ex} est l'énergie minimale qu'il faut fournir à un électron pour l'extraire de l'atome auquel il appartient. Ce travail dépend de l'élément chimique.

Or UN électron ne peut interagir qu'avec UN photon. Un électron ne peut donc être extrait que s'il a une énergie suffisante : électron extrait $\Leftrightarrow$ $E_{\text{photon}} \geq W_{\text{ex}}$

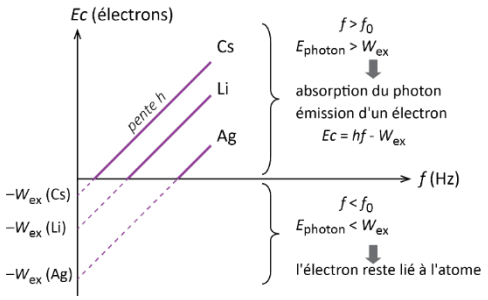
Équation d'Einstein

Si le photon est absorbé, son énergie se conserve et est convertie par l'électron de deux manières :
- → en travail d'extraction pour rompre la liaison atome – électron ;
- → en énergie cinétique pour l'électron extrait.

Il faut $f \geq f_0 = \frac{W_{ex}}{h}$

Si $f > f_0$: un électron est émis avec une énergie cinétique de valeur :

$$Ec_{\text{électron}} = E_{photon} - W_{ex}$$
$$= hf - W_{ex}$$



Applications contemporaines

Le modèle quantique de la lumière, couplé à la découverte des semi-conducteurs, a conduit à des objets utilisés au quotidien : photodiodes, photorésistances, cellules photovoltaïques, LED, diodes lasers…

Tous ces composants assurent la conversion : **travail électrique ↔ rayonnement**

Pour une cellule photovoltaïque, le rendement de la conversion énergétique s'exprime :

$$\eta = \frac{\mathcal{P}_{utile}}{\mathcal{P}_{recue}} = \frac{\mathcal{P}_{max}}{\mathcal{P}_{lum}}$$

avec
- η : sans unité
- $\mathcal{P}_{max}$: la puissance électrique maximale associée au fonctionnement de la cellule en W
- $\mathcal{P}_{lum}$: la puissance lumineuse reçue par la cellule en W