

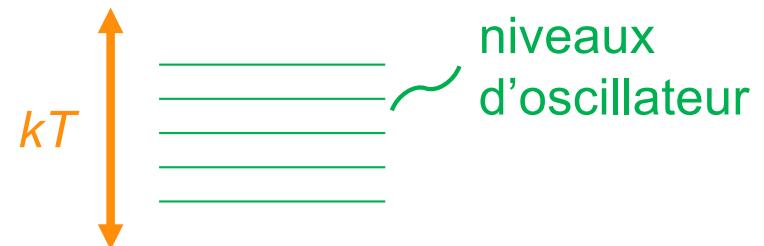
Cours 08

Nature quantique du rayonnement

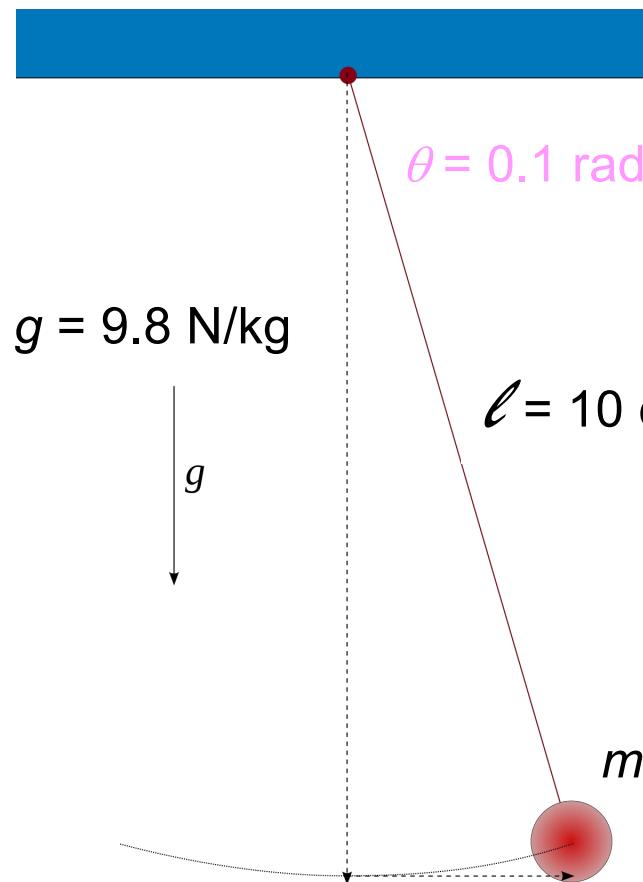
- Limites de la physique classique
 - Exemple : pendule
 - Constante de Planck
 - Régime de physique quantique
- Effet photoélectrique
 - Observations
 - Limites de la physique classique
 - Théorie d'Einstein
- Quantité de mouvement du photon

Limite de la physique classique

- Nous avons vu que pour $h\nu \ll kT$ la loi de Planck correspond à la loi classique de Rayleigh-Jeans.
- En général, la physique classique s'obtient comme limite de la physique quantique, qui a une validité plus générale, en prenant la limite $h \rightarrow 0$.
- Pourquoi ces idées ne se manifestent pas dans les phénomènes de la vie de tous les jours ?



Cas du pendule



1. Fréquence :

$$\nu = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{\ell}} = 1.58 \text{ s}^{-1}$$

$$\Delta E = h\nu = 1.05 \cdot 10^{-33} \text{ J}$$

2. Énergie typique: énergie potentielle à $\theta = 0.1 \text{ rad}$:

$$\begin{aligned} E &= m g \Delta z = m g \ell (1 - \cos \theta) \\ &= 2.45 \cdot 10^{-5} \text{ J} \end{aligned}$$

3. Rapport :

$$\frac{\Delta E}{E} \cong 4 \cdot 10^{-29}$$

Constante de Planck

$$h = 6.62607015 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$

La valeur de la constante de Planck est “petite” par rapport aux grandeurs typiques dans la vie quotidienne.

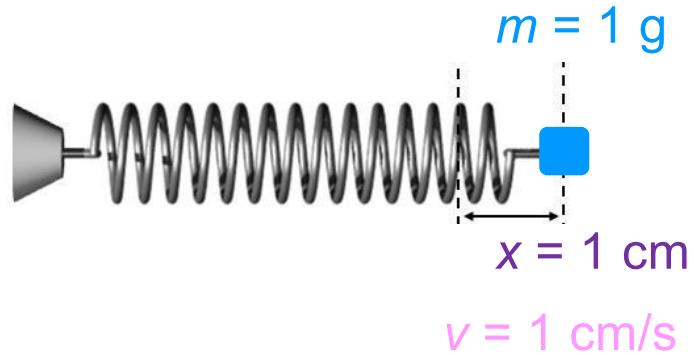
C'est la raison ultime pour laquelle les effets quantiques n'apparaissent pas dans la vie de tous les jours.

Dimension de h :

$$\begin{aligned}[h] &= [\text{énergie}] \cdot [\text{temps}] \\ &= [\text{quantité de mouvement}] \cdot [\text{longueur}] \\ &= [\text{moment cinétique} : \vec{L} = \vec{r} \times \vec{p}] \end{aligned}$$

Exemples d'analyses dimensionnelles

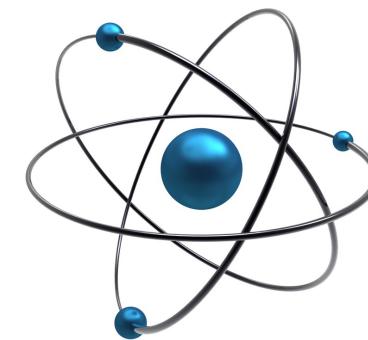
Exemple 1 : ressort



$$\begin{aligned} p \cdot x &= mv \cdot x \\ &= 10^{-3} \text{ kg} \cdot 10^{-2} \text{ m/s} \cdot 10^{-2} \text{ m} \\ &= 10^{-7} \text{ J}\cdot\text{s} \gg h \end{aligned}$$

Régime classique

Exemple 2 : électron dans un atome



$$\begin{aligned} m &= 9.1 \cdot 10^{-31} \text{ kg} \\ r_0 &= 5.29 \cdot 10^{-11} \text{ m} \text{ (rayon de Bohr)} \\ v &= 2 \cdot 10^6 \text{ m/s} \text{ (vitesse de l'électron)} \end{aligned}$$

Moment cinétique :

$$mv \cdot r_0 \approx 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s} \approx h$$

Régime quantique

Cours 08

Nature quantique du rayonnement

- Limites de la physique classique
 - Exemple : pendule
 - Constante de Planck
 - Régime de physique quantique
- Effet photoélectrique
 - Observations
 - Limites de la physique classique
 - Théorie d'Einstein
- Quantité de mouvement du photon

Effet photoélectrique : applications

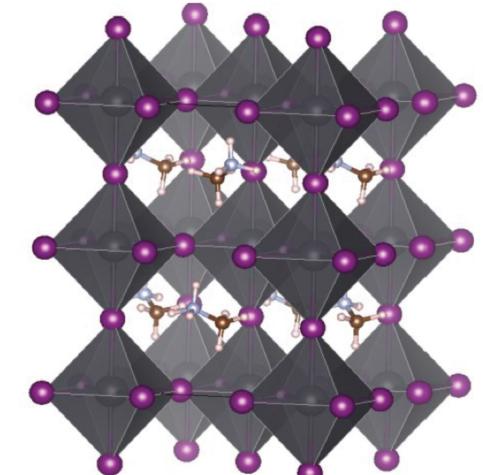
Énergie photovoltaïque



silicon solar cells



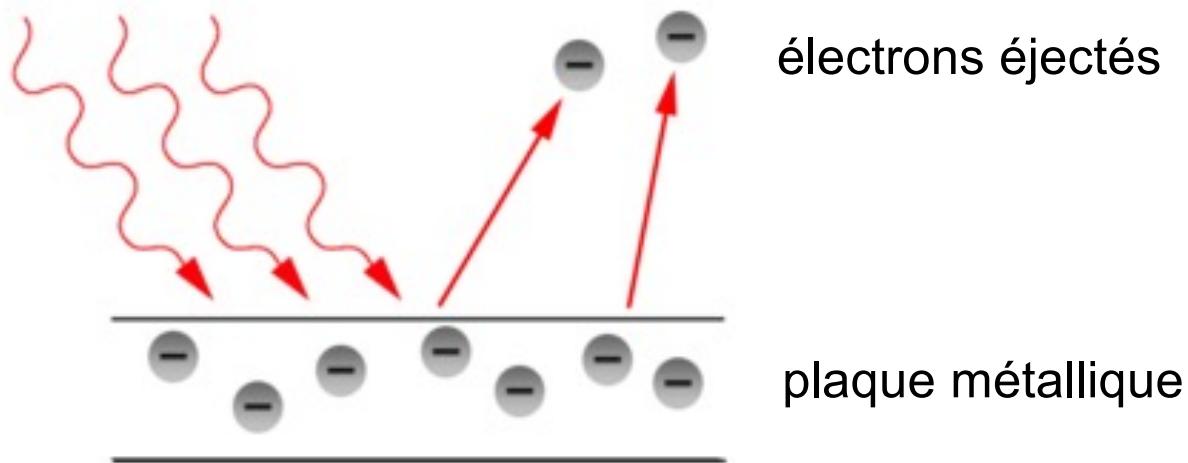
dye sensitized solar cells
SwissTech Convention Center



perovskite solar cells

Effet photoélectrique

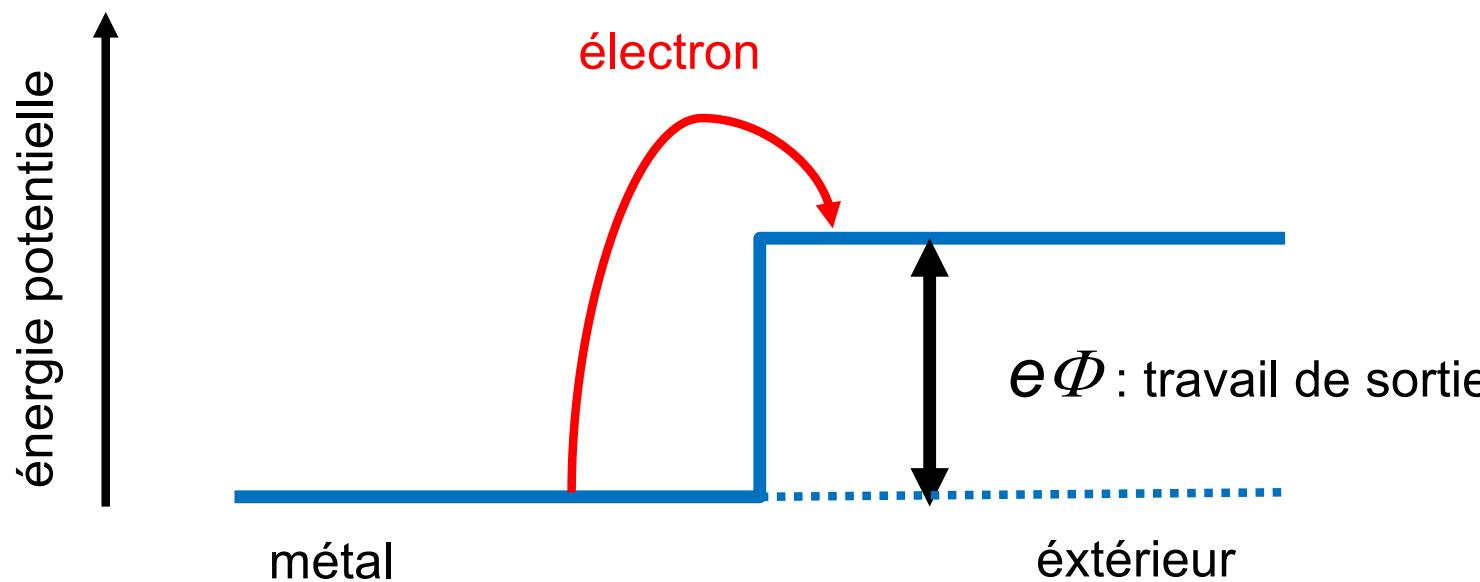
rayonnement énergétique



Phénomène : une plaque métallique émet des électrons lorsqu'elle est illuminée par un rayonnement u.v.

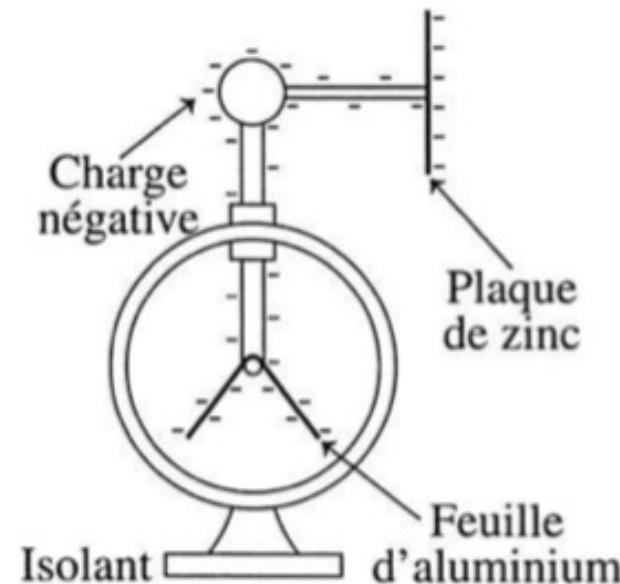
Explication classique

les électrons absorbent et cumulent l'énergie apportée par le rayonnement jusqu'à ce qu'ils sont assez énergétiques pour sortir de la plaque.



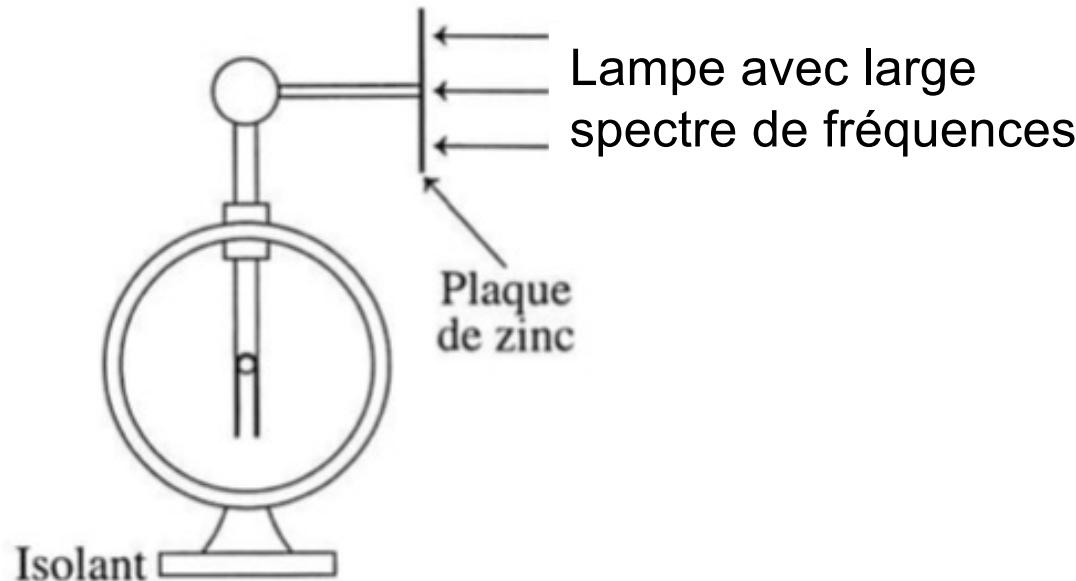
mais étudions ce phénomène plus en détail ...

Expérience de Hallwachs

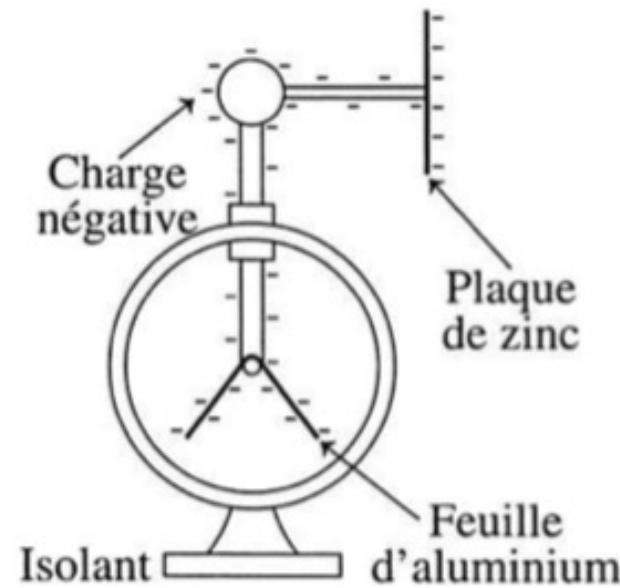


Wilhelm Hallwachs
1859 - 1922

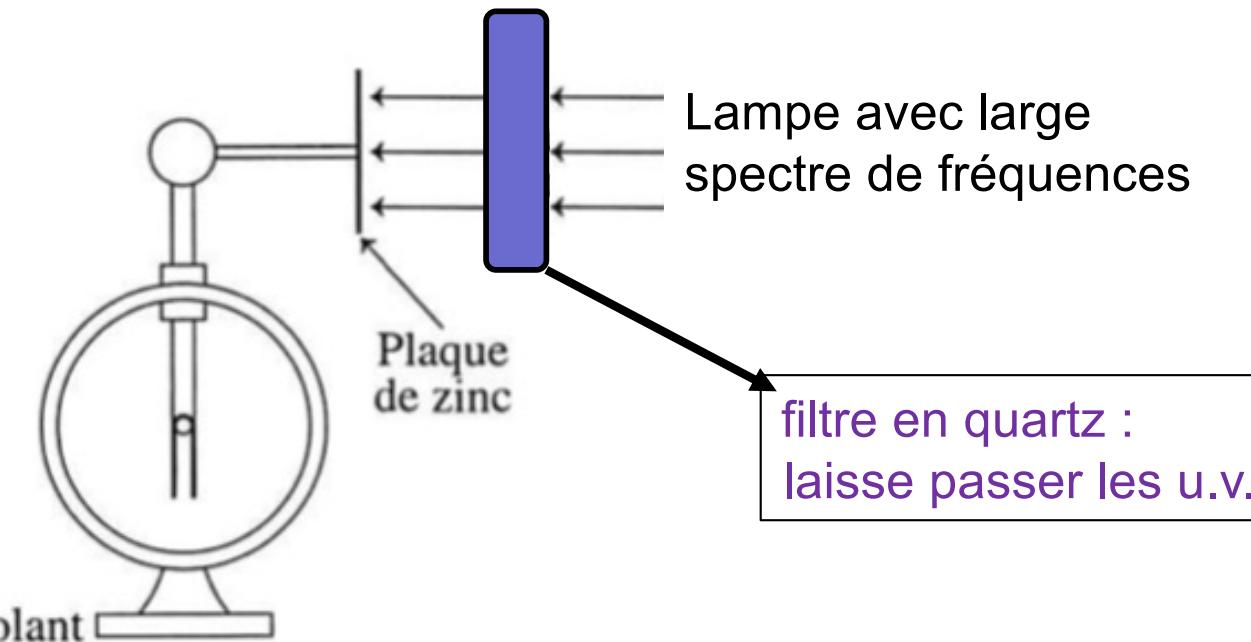
On observe la perte de la charge négative (émission d'électrons).



Expérience de Hallwachs (2)

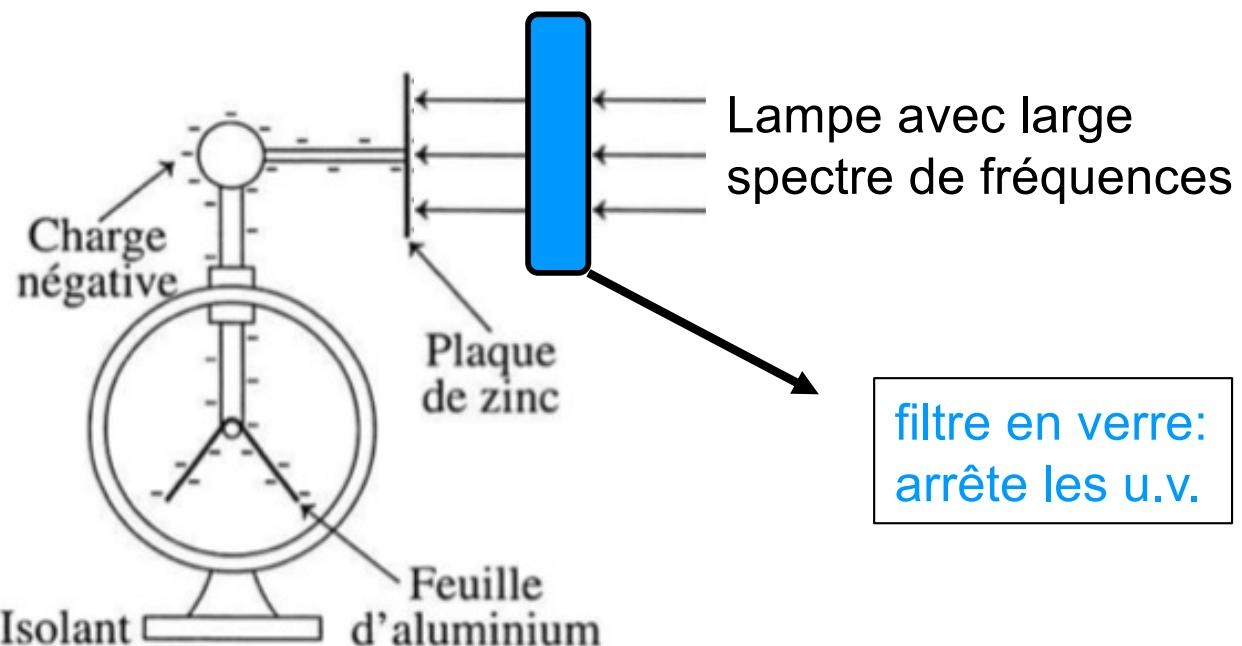
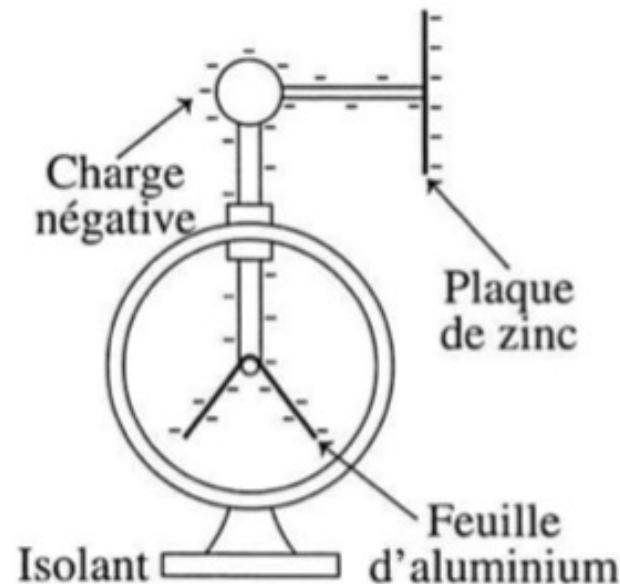


On observe l'émission d'électrons.



filtre en quartz : laisse passer les u.v.

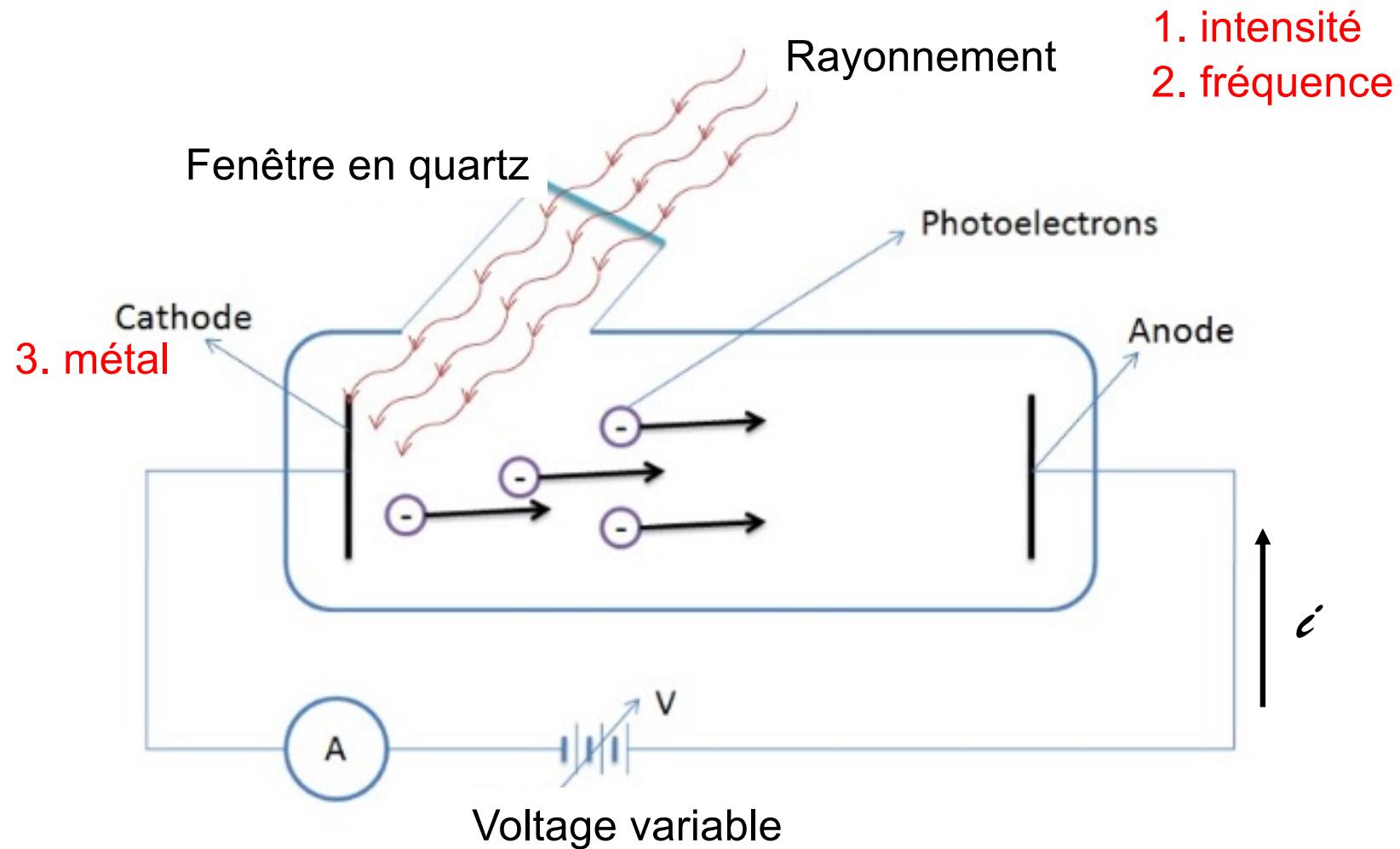
Expérience de Hallwachs (3)



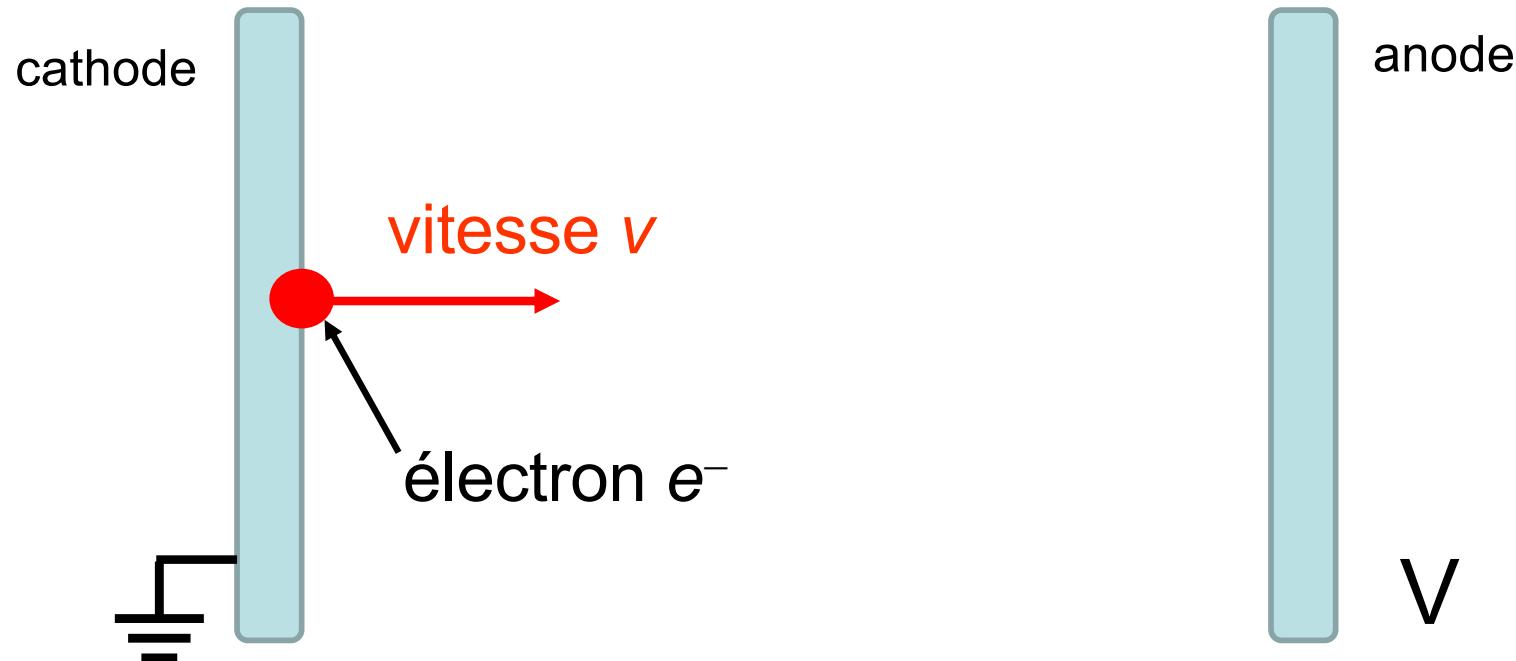
Les électrons ne
sont pas émis.

filtre en verre:
arrête les u.v.

Effet photoélectrique : dispositif plus avancé



Émission de photoélectrons à vitesse v

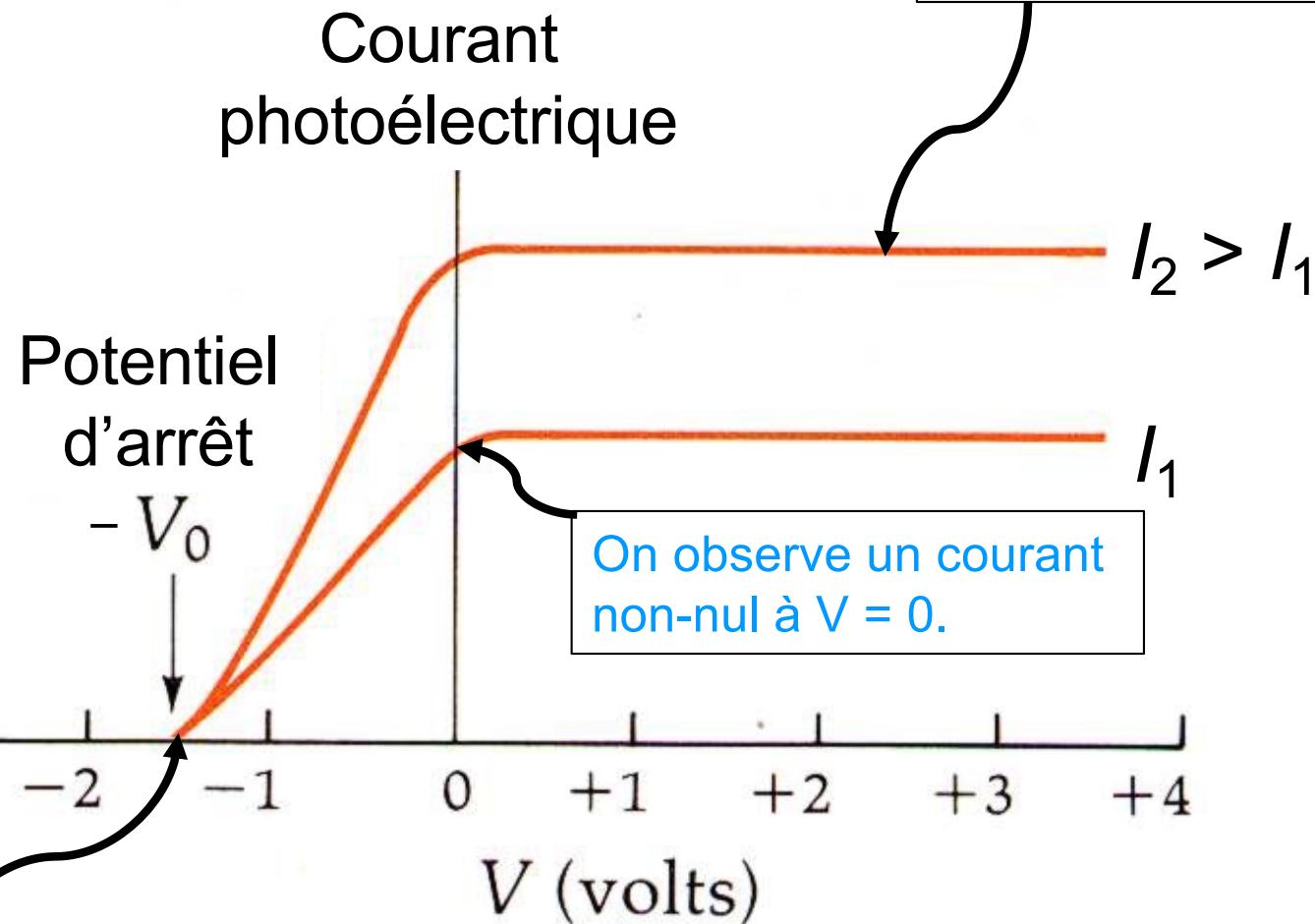


- Si V est positif, l'électron est attiré par l'anode et va accélérer.
- Si V est négatif, l'électron va décélérer.
- Si $V = -V_0$ (potential d'arrêt), l'électron va arriver à l'anode avec vitesse nulle. Conservation de l'énergie: $E_{\text{initiale}} = E_{\text{finale}} \rightarrow E_{\text{cin}} = eV_0$.

Effet photoélectrique : observations générales

à fréquence ν fixée

On observe saturation avec plus de photoélectrons



V_0 ne dépend pas de l'intensité

On observe un courant non-nul à $V = 0$.

$eV_0 = E_{\text{cin},\text{max}}$ mesure l'énergie cinétique maximale des photoélectrons

Carnet d'observations : observations générales

Explication classique

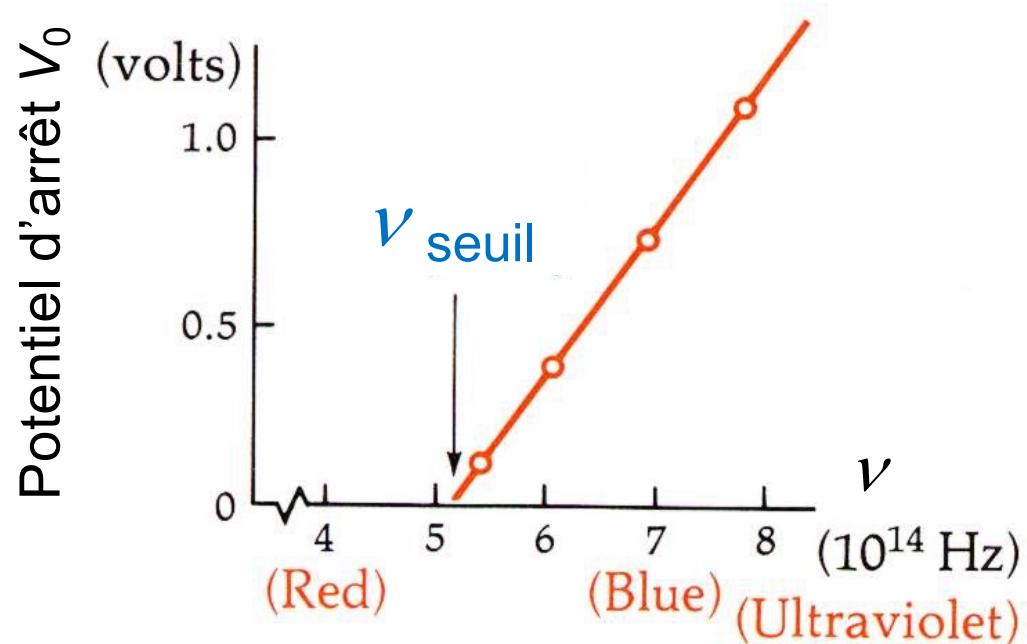
- À $V = 0$, $\epsilon \neq 0$ Les électrons absorbent l'énergie é.m.
- Il y a saturation pour grand V Tous les électrons émis sont récoltés.
- Pour $V < -V_0$, $\epsilon = 0$ V_0 détermine l'énergie des électrons plus énergétiques.
Pourquoi y a-t-il une valeur maximale ?

Carnet d'observations : changement d'intensité

Explication classique

- Pour $I_2 > I_1$, mais avec $\nu_1 = \nu_2$, on a $\zeta_2 > \zeta_1$ à saturation
Plus d'électrons sont émis, puis récoltés.
- V_0 ne dépend pas de l'intensité
Avec plus d'intensité, l'énergie cinétique des électrons les plus énergétiques devrait augmenter ... ?

Effet photoélectrique : changement de fréquence



Fréquence ν de la lumière monochromatique incidente

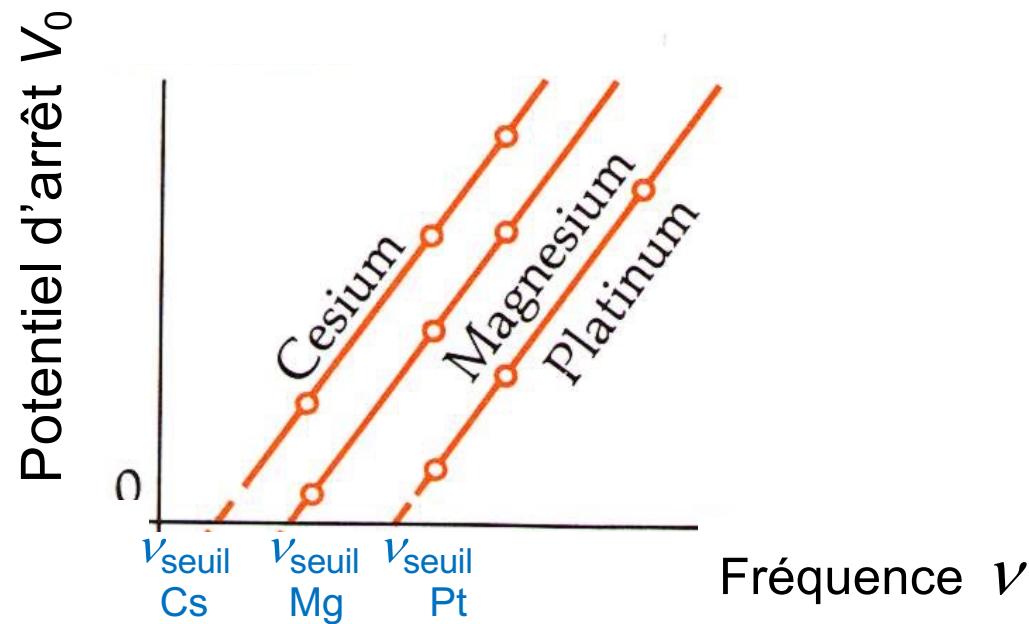
- Le potentiel d'arrêt V_0 dépend linéairement de ν pour $\nu > \nu_{\text{seuil}}$
- Pas d'effet photoélectrique pour $\nu < \nu_{\text{seuil}}$

Carnet d'observations : changement de fréquence

Explication classique

- $e = 0$ pour $\nu < \nu_{\text{seuil}}$ L'électron devrait pouvoir accumuler l'énergie nécessaire à toute fréquence ?
- Pour $\nu > \nu_{\text{seuil}}$ V_0 augmente linéairement :
$$V_0 = \alpha(\nu - \nu_{\text{seuil}})$$
 Le rôle de la fréquence n'est pas clair !

Effet photoélectrique : changement de matériau



- Fréquences de seuil différentes
- Même pente

Carnet d'observations : changement de matériau

Explication classique

- ν_{seuil} dépend du matériau

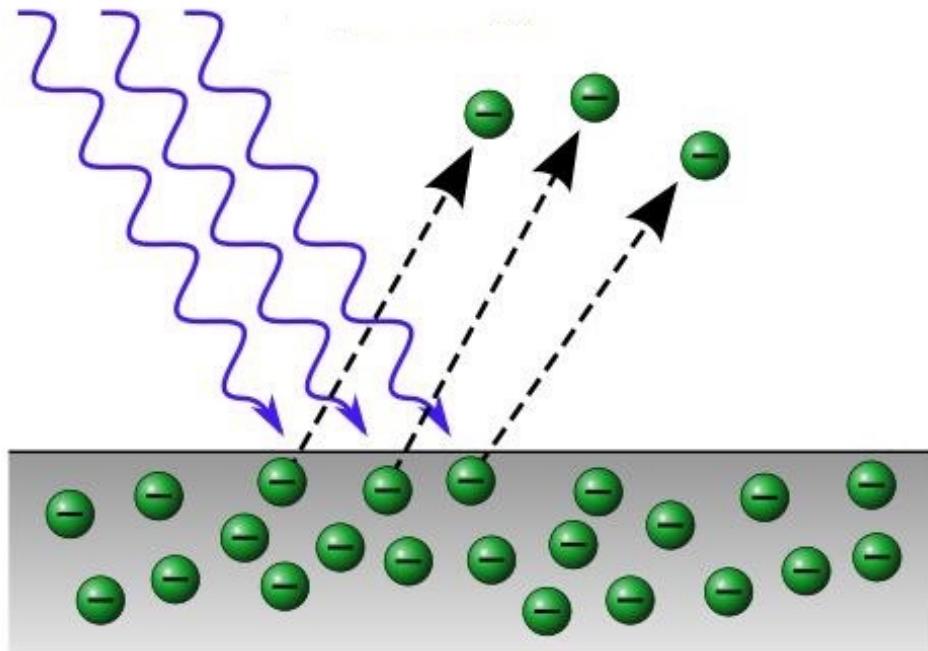
?

- La pente α ne dépend pas du matériau :

?

$$V_0 = \alpha (\nu - \nu_{\text{seuil}})$$

Délai de photoémission



- L'émission de l'électron est quasi-instantanée suite à l'arrivée du photon, même à intensité basse.

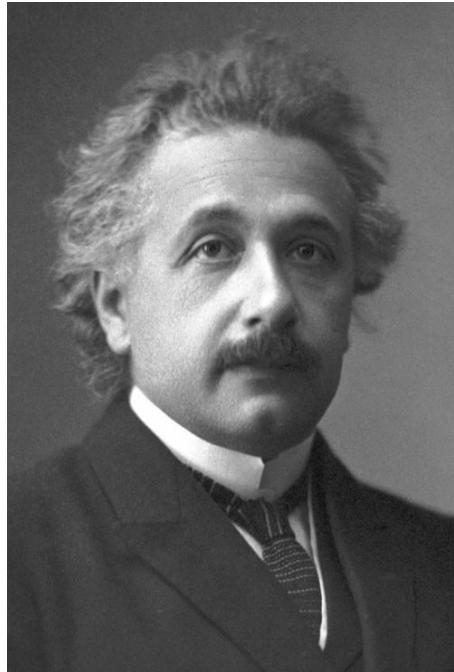
Carnet d'observation : délai de temps

Explication classique

- Absence de délai entre l'absorption de l'énergie é.m. et l'émission d'électrons

Il faudrait un certain temps pour accumuler l'énergie nécessaire ... ?

Théorie d'Einstein (1905)



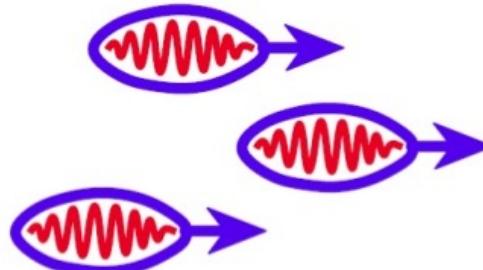
Albert Einstein
1879 - 1955



Prix Nobel
1921

Hypothèses

1. Dans certaines circonstances (effet photoélectrique), l'onde é.m. se comporte comme si son énergie était localisée dans l'espace (localisation de l'énergie) :
Concept de quantum de rayonnement : le photon



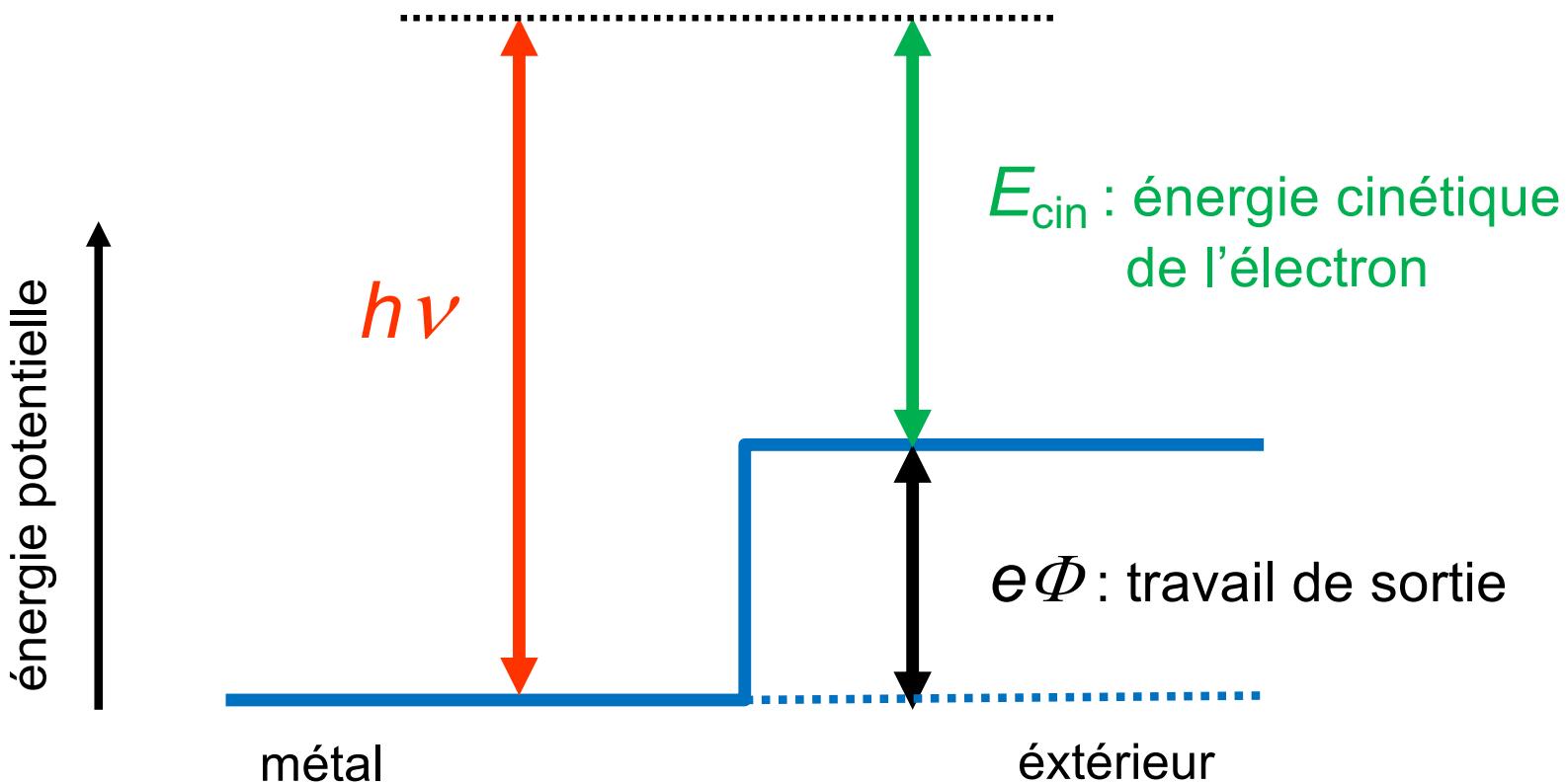
2. L'énergie du photon est :

$$E = h\nu$$

Interprétation de l'effet photoélectrique (Einstein)

L'effet photoélectrique s'explique par une interaction entre 1 photon et 1 électron : une partie de l'énergie du photon est utilisée pour sortir du métal, la partie restante confère de l'énergie cinétique à l'électron.

Bilan énergétique : $h\nu = e\Phi + E_{\text{cin}}$



Carnet d'observations : observations générales

	Explication classique	Explication d'Einstein
■ À $V = 0$, $\epsilon \neq 0$	Les électrons absorbent l'énergie é.m.	
■ Il y a saturation pour grand V	Tous les électrons émis sont récoltés	
■ Pour $V < -V_0$, $\epsilon = 0$	V_0 détermine l'énergie des électrons plus énergétiques. Pourquoi y a-t-il une valeur maximale ?	$eV_0 = E_{\text{cin},\text{max}} = h\nu - e\Phi$ Lorsque la fréquence ν utilisée est fixée, V_0 a ainsi une valeur maximale

Effet photoélectrique: changement d'intensité

- Pour $I_2 > I_1$, mais avec $\nu_1 = \nu_2$, on a $\zeta_2 > \zeta_1$ à saturation

Explication classique

- V_0 ne dépend pas de l'intensité

Plus d'électrons sont émis, puis récoltés

Avec plus d'intensité, l'énergie cinétique des électrons les plus énergétiques devrait augmenter ... ?

Explication d'Einstein

$$eV_0 = E_{\text{cin},\text{max}} = h\nu - e\Phi$$

V_0 dépend de la fréquence ν mais pas de l'intensité

Carnet d'observations : changement de fréquence

	Explication classique	Explication d'Einstein
<ul style="list-style-type: none"> $e = 0$ pour $\nu < \nu_{\text{seuil}}$ 	L'électron devrait pouvoir accumuler l'énergie nécessaire à toute fréquence ?	Si $h\nu < e\Phi$, l'électron ne reçoit pas assez d'énergie pour sortir.
<ul style="list-style-type: none"> Pour $\nu > \nu_{\text{seuil}}$ V_0 augmente linéairement : $V_0 = \alpha(\nu - \nu_{\text{seuil}})$	Le rôle de la fréquence n'est pas clair !	$eV_0 = E_{\text{cin},\text{max}} = h\nu - e\Phi$ $V_0 = (h/e)(\nu - e\Phi/h)$

Carnet d'observations : changement de matériau

	Explication classique	Explication d'Einstein
<ul style="list-style-type: none">■ ν_{seuil} dépend du matériau■ La pente α ne dépend pas du matériau : $V_0 = \alpha (\nu - \nu_{\text{seuil}})$?	$\nu_{\text{seuil}} = e\Phi/h$ ν_{seuil} dépend du travail de sortie $e\Phi$, qui est une propriété du matériau.
	?	$\alpha = h/e$ La pente α dépend de la constante de Planck, qui est indépendante du matériau.

Carnet d'observation : délai de temps

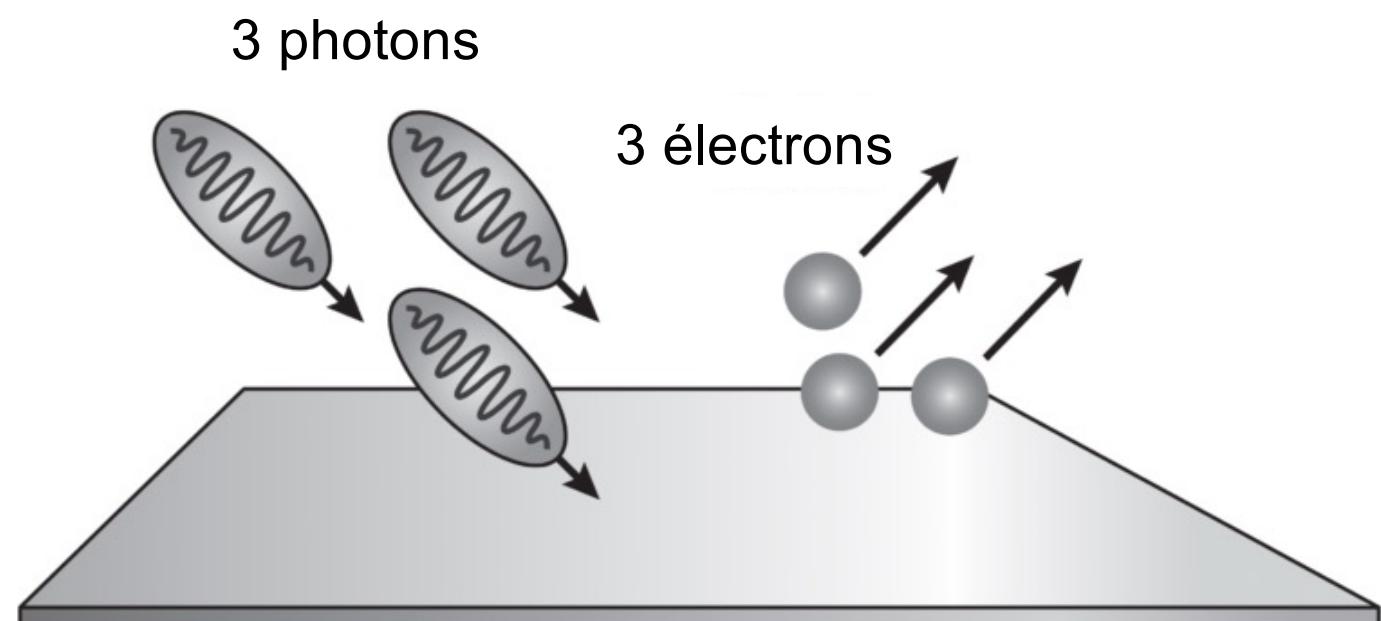
- Absence de délai entre l'absorption de l'énergie é.m. et l'émission d'électrons

Explication classique

Il faudrait un certain temps pour accumuler l'énergie nécessaire ... ?

Explication d'Einstein

L'énergie est localisée : 1 photon interagit avec 1 électron



Cours 08

Nature quantique du rayonnement

- Limites de la physique classique
 - Exemple : pendule
 - Constante de Planck
 - Régime de physique quantique
- Effet photoélectrique
 - Observations
 - Limites de la physique classique
 - Théorie d'Einstein
- Quantité de mouvement du photon

Quantité de mouvement du photon

Formule relativiste pour l'énergie et la quantité de mouvement d'une particule

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

$$p = \frac{mv}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

Mais si la particule a une vitesse $v = c$, comme le photon, ces formules ne sont pas bien définies. Il convient d'utiliser les expressions équivalentes suivantes :

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

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

Pour $v = c$, on trouve maintenant $p = E/c$ et masse $m = 0$.

Pour le photon, on a alors :

$$p_{\text{photon}} = \frac{E_{\text{photon}}}{c} = \frac{h\nu}{c}$$

Einstein (1916)

Cours 08

Nature quantique du rayonnement

- Limites de la physique classique
 - Exemple : pendule
 - Constante de Planck
 - Régime de physique quantique
- Effet photoélectrique
 - Observations
 - Limites de la physique classique
 - Théorie d'Einstein
- Quantité de mouvement du photon