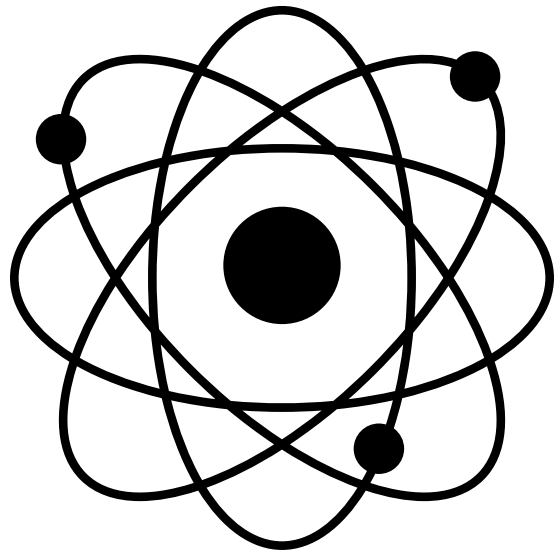


INTERACTION DES RAYONNEMENTS IONISANTS AVEC LA MATIERE



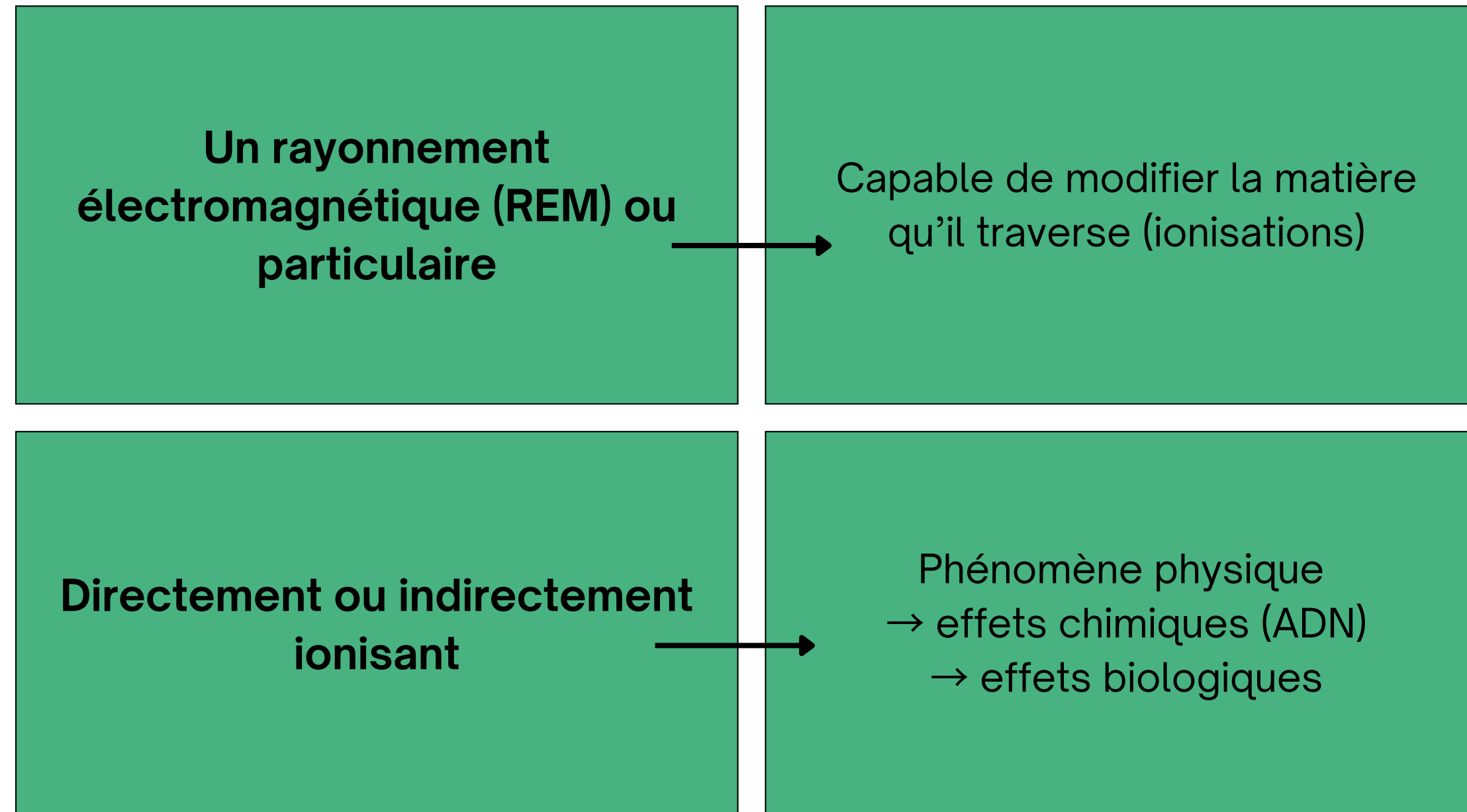
**1) INTRODUCTION AUX
RAYONNEMENTS
IONISANTS**

**2) MECANISMES GENERAUX
DES INTERACTIONS AVEC LA
MATIERE**

**3) INTERACTIONS DES
PHOTONS/PARTICULES**



QU'EST CE QU'UN RI ?



A QUOI SERVENT-ILS ?

Explorations diagnostiques



Scanner, TEP...

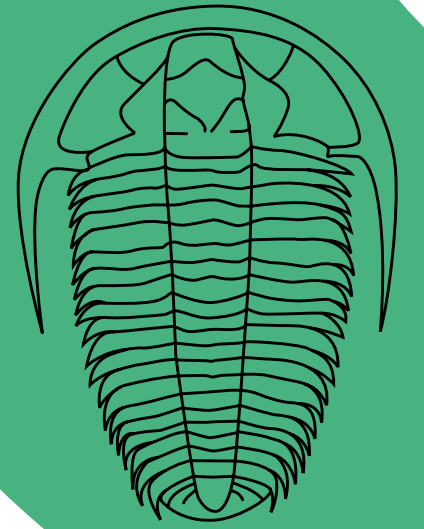
Santé



Radiothérapie, radioprotection



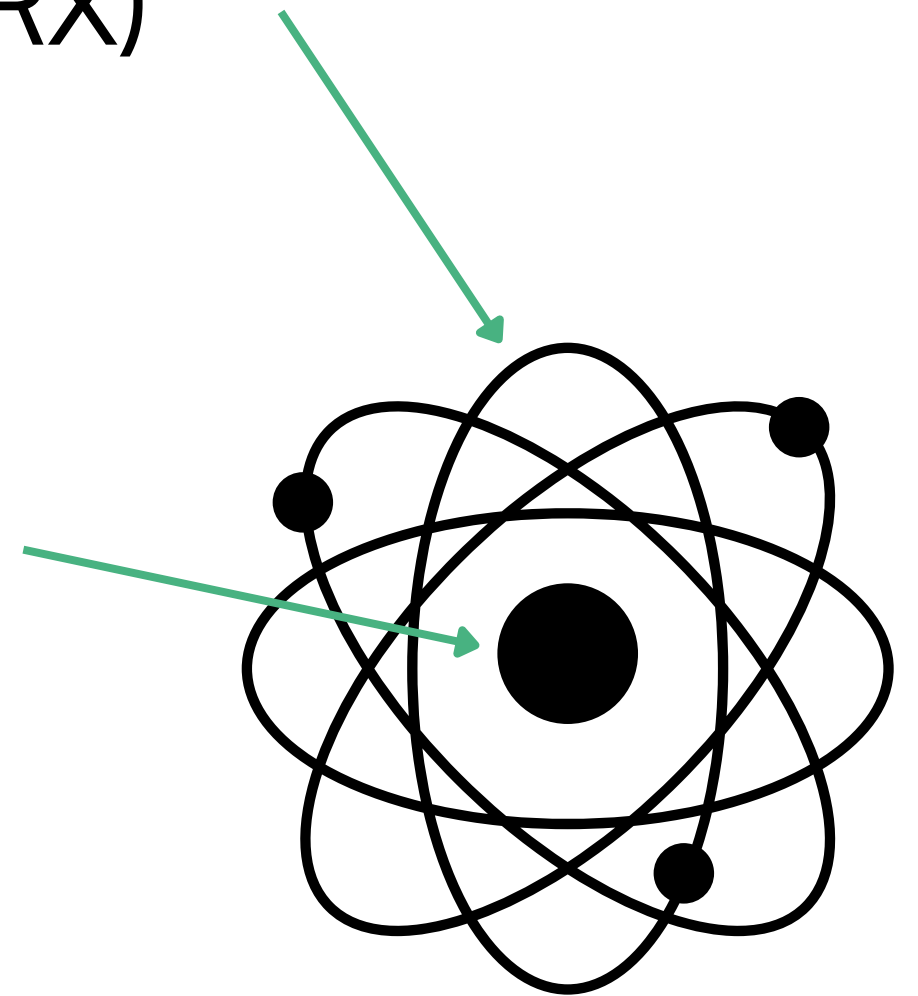
D'OU PROVIENNENT-ILS ?



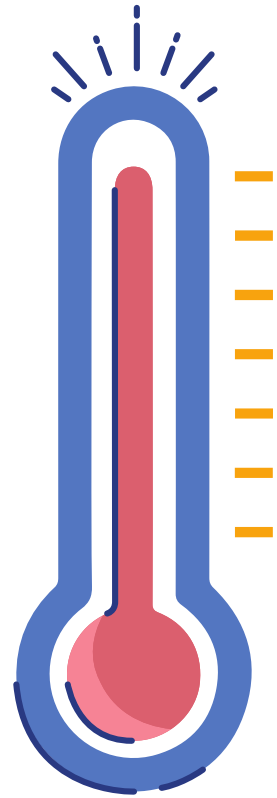
→ nuage électronique (RX)

- Ils proviennent de l'atome

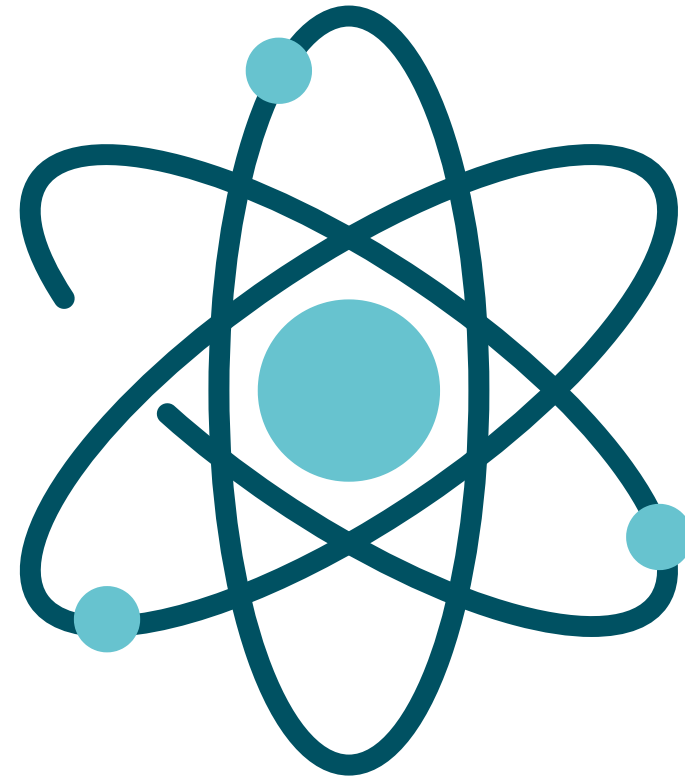
→ noyau (radioactivité)



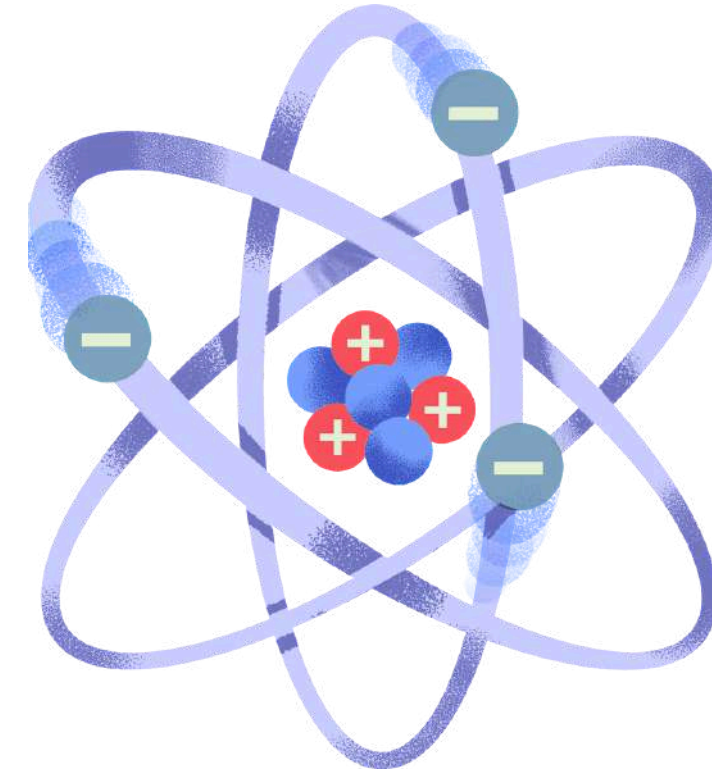
MECANISMES GENERAUX



Simple échauffement



Excitation



Ionisation



LE PHOTON

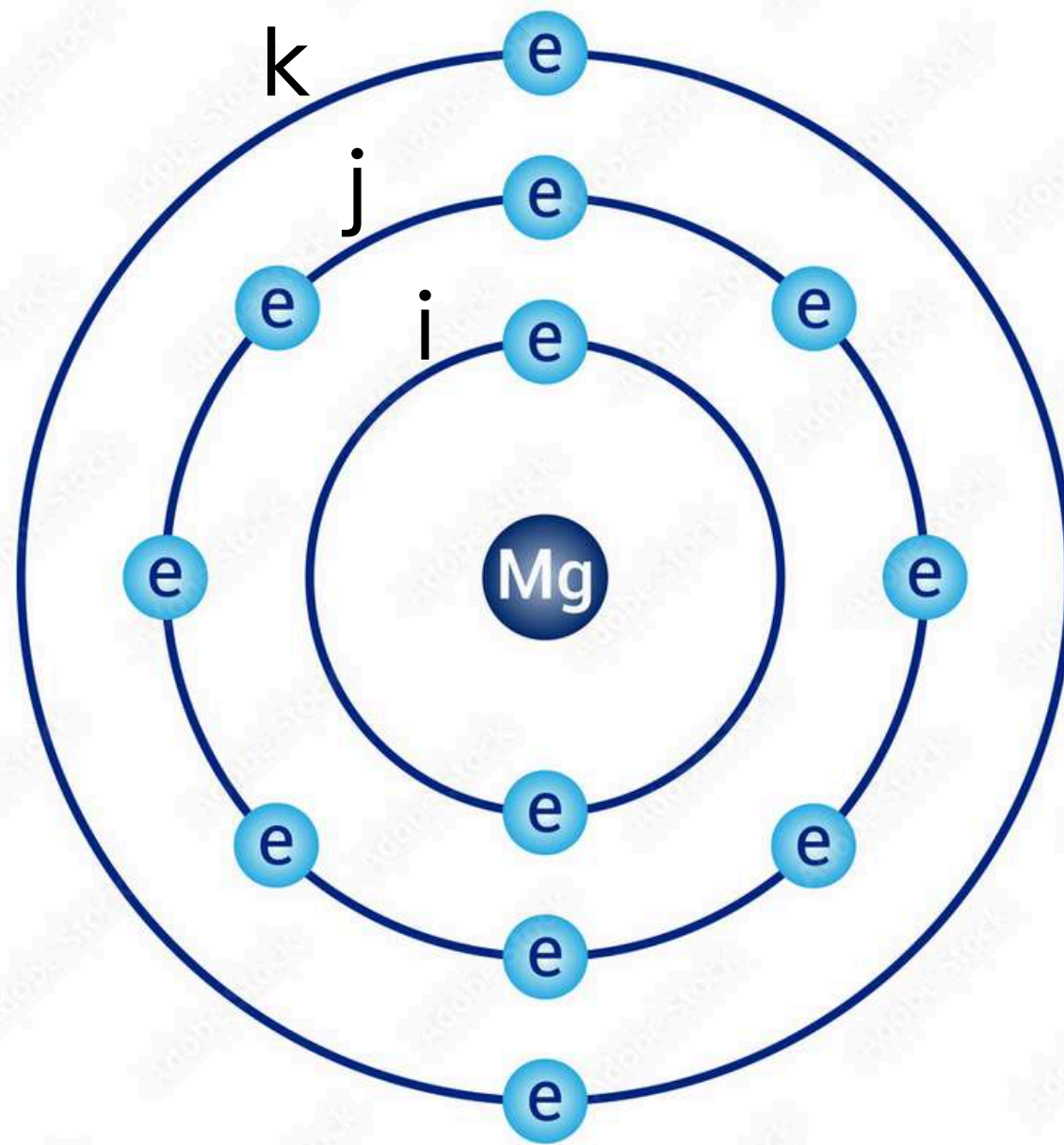


$$E = h\nu$$

h = constante de Plank

ν = fréquence de vibration du REM

L'ATOME



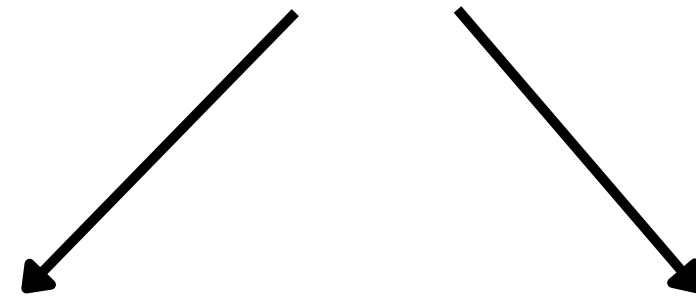
Modèle de Bohr

→
Couches électroniques (i, j, k...)

- Énergie de l'électron = W_i
- Énergie de liaison de l'électron = $|W_i|$

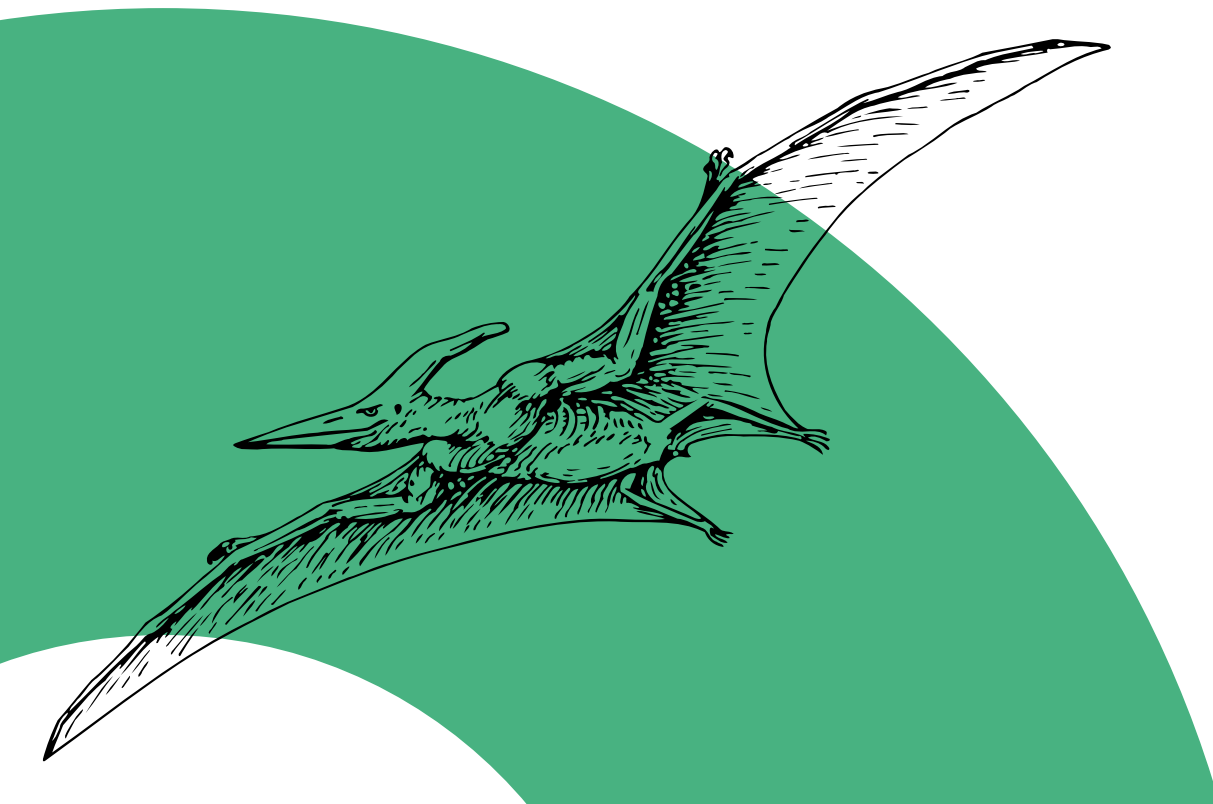
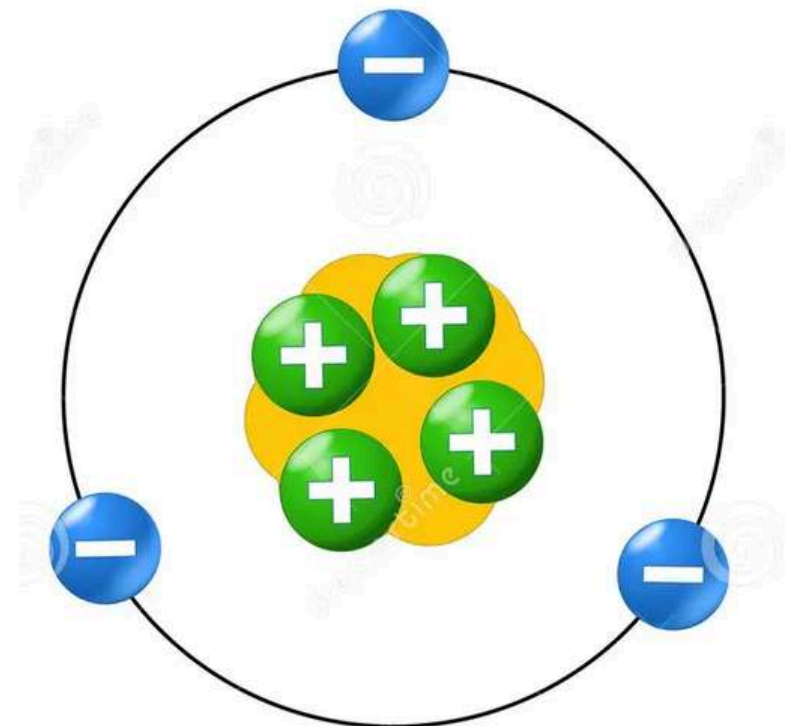
↙ C'est l'énergie qu'il faut apporter à l'électron pour l'arracher

LES INTERACTIONS DE BASE



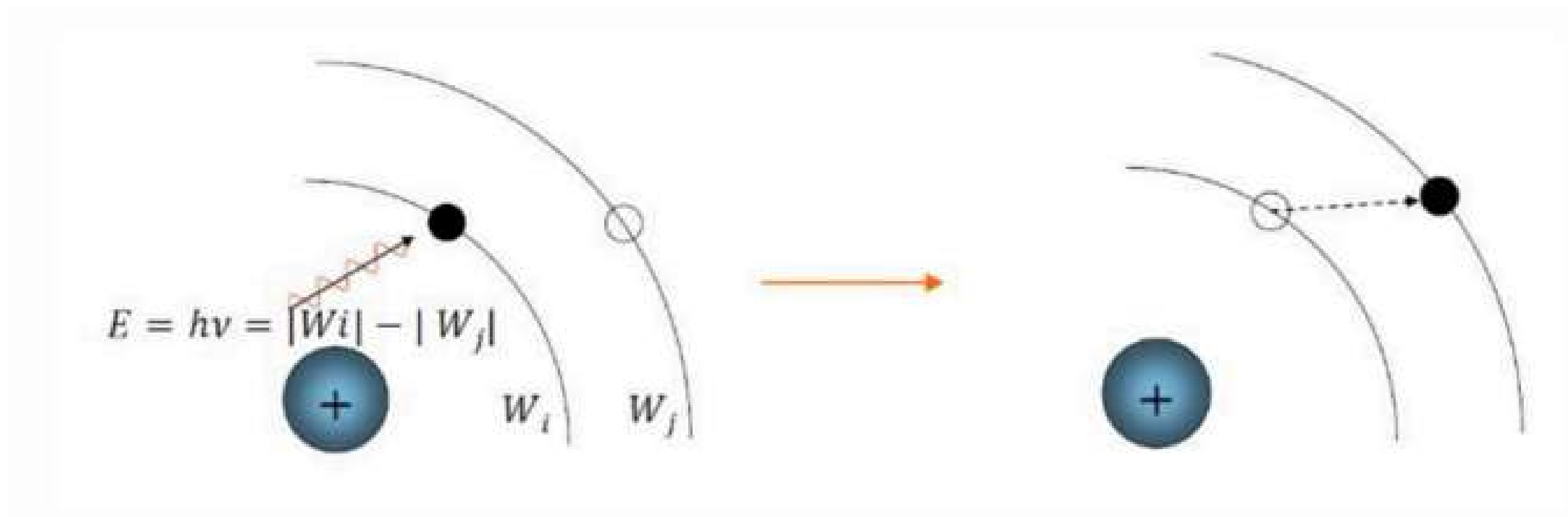
Excitation

Ionisation



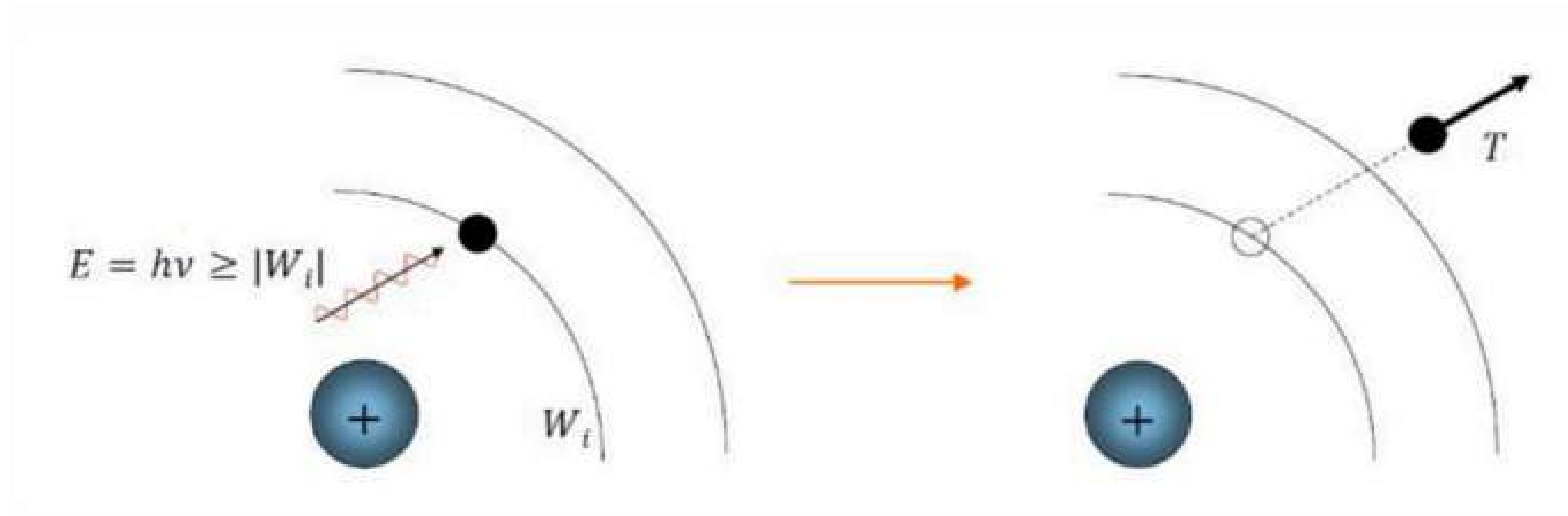
EXCITATION

- Si $E < |W_i| - |W_j| \rightarrow$ simple échauffement
- Si $E = |W_i| - |W_j| \rightarrow$ absorption de l'énergie \rightarrow case vacante
- Energie absorbée \rightarrow quantifiée (valeurs bien définies) ; état instable



IONISATION

- Si $E \geq |W_i| \rightarrow$ excès d'énergie
- Énergie cinétique $T = h\nu - |W_i|$
- Énergie pas quantifiée (continue) ; état instable



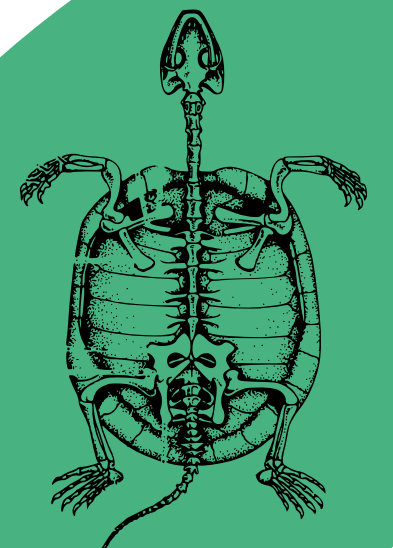
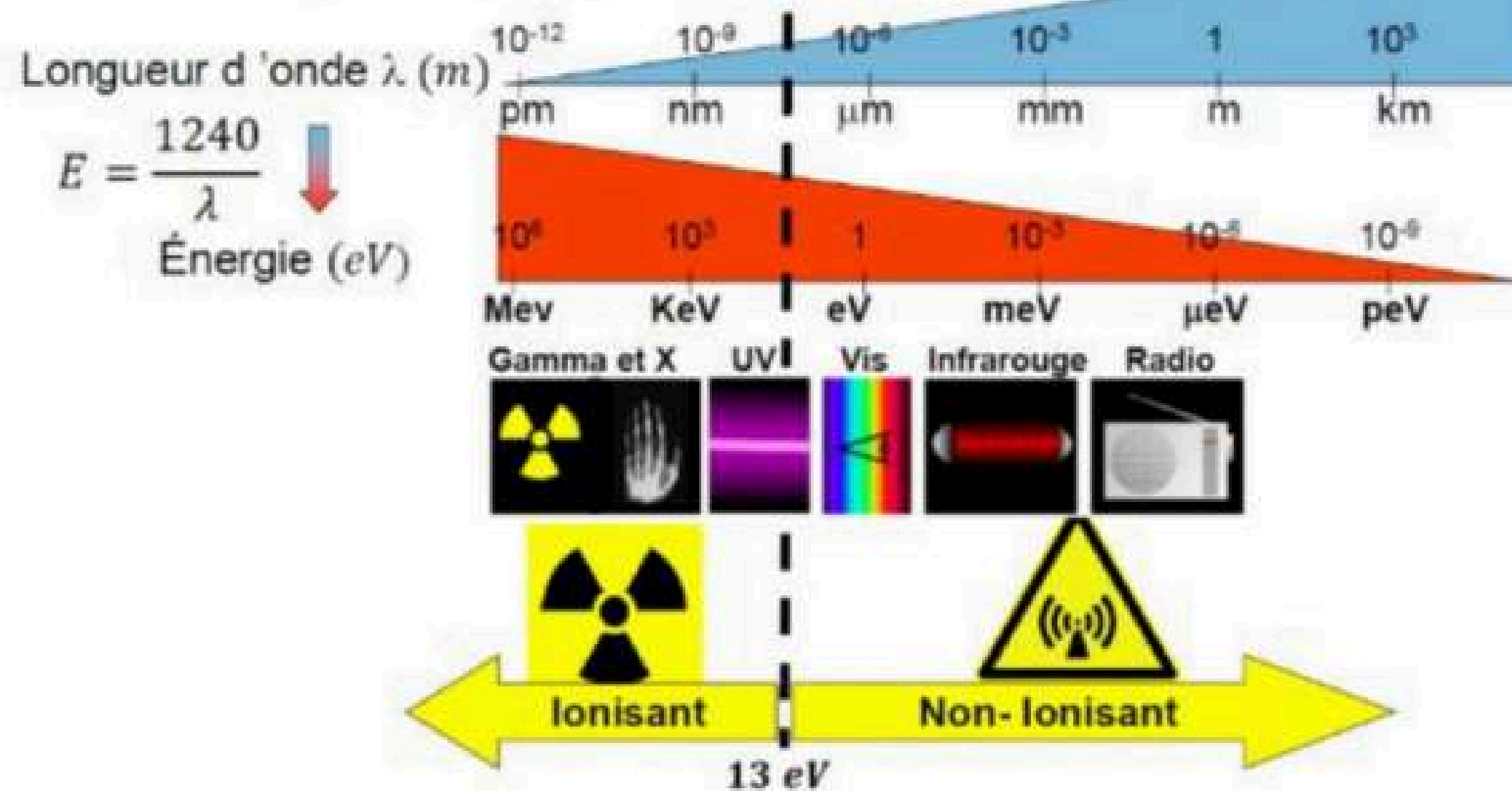
IONISANT OU NON-IONISANT ?

Cela dépend de l'énergie de liaison moyenne des électrons dans les atomes qui constituent cette matière $\rightarrow h\nu \geq |W_n|$

On prend comme seuil celle d'une molécule d'eau :

$$W_{\text{H}_2\text{O}} \approx 13,6 \text{ eV}$$

Spectre des rayonnements électromagnétiques



DIRECTEMENT OU INDIRECTEMENT IONISANT ?

LES PARTICULES CHARGÉES :

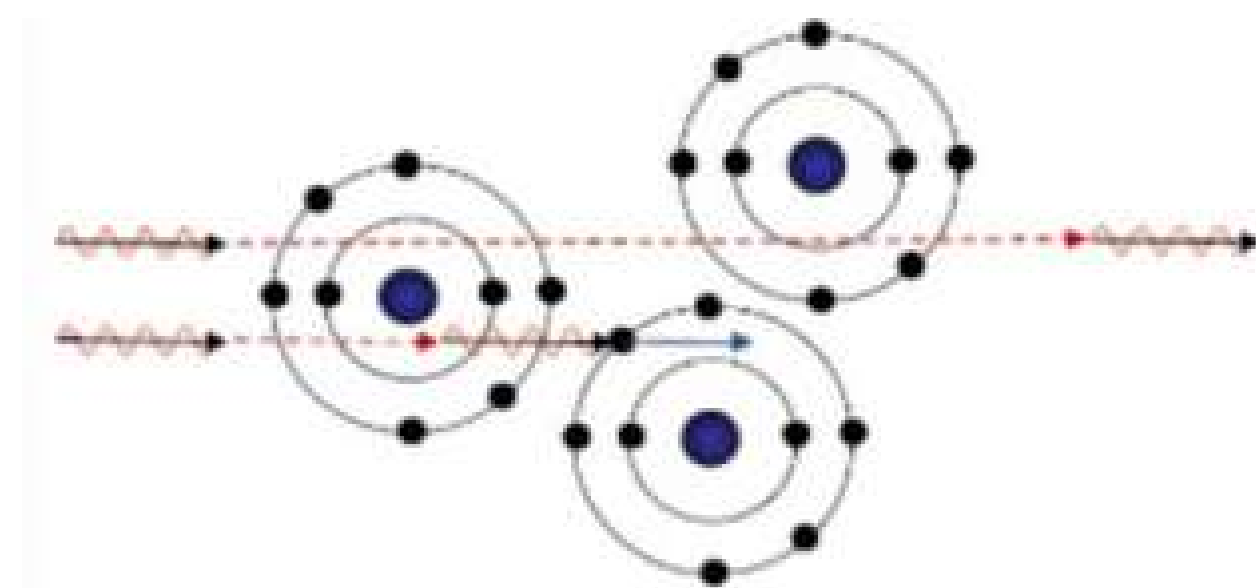
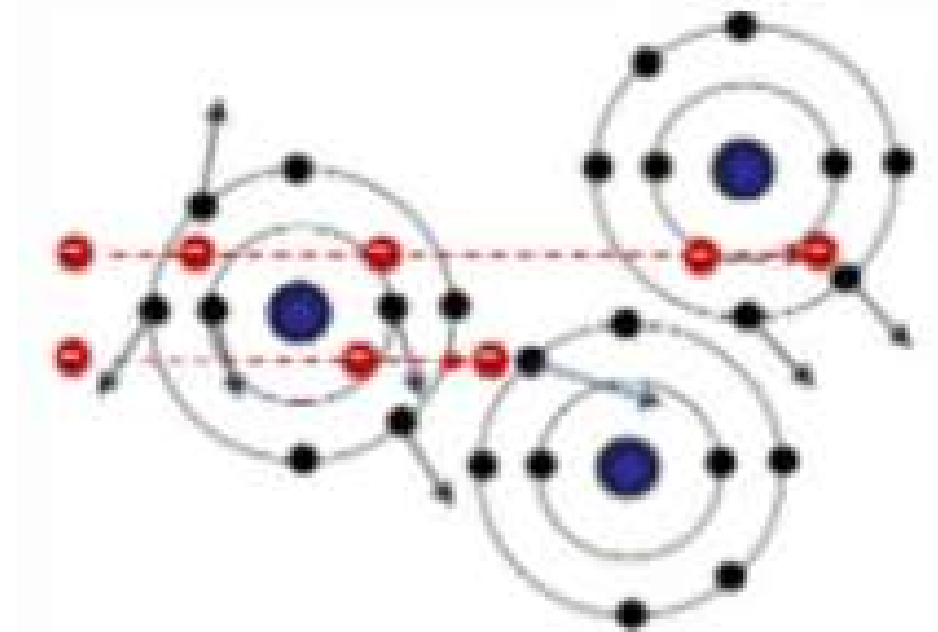
$\alpha^{2+}; \beta^{+}; \beta^{-}; e^{-}; p^{+}$

- Directement ionisantes
- Interactions obligatoires
- Interactions coulombiennes (électrostatiques)

LES REM ET LES PARTICULES NEUTRES :

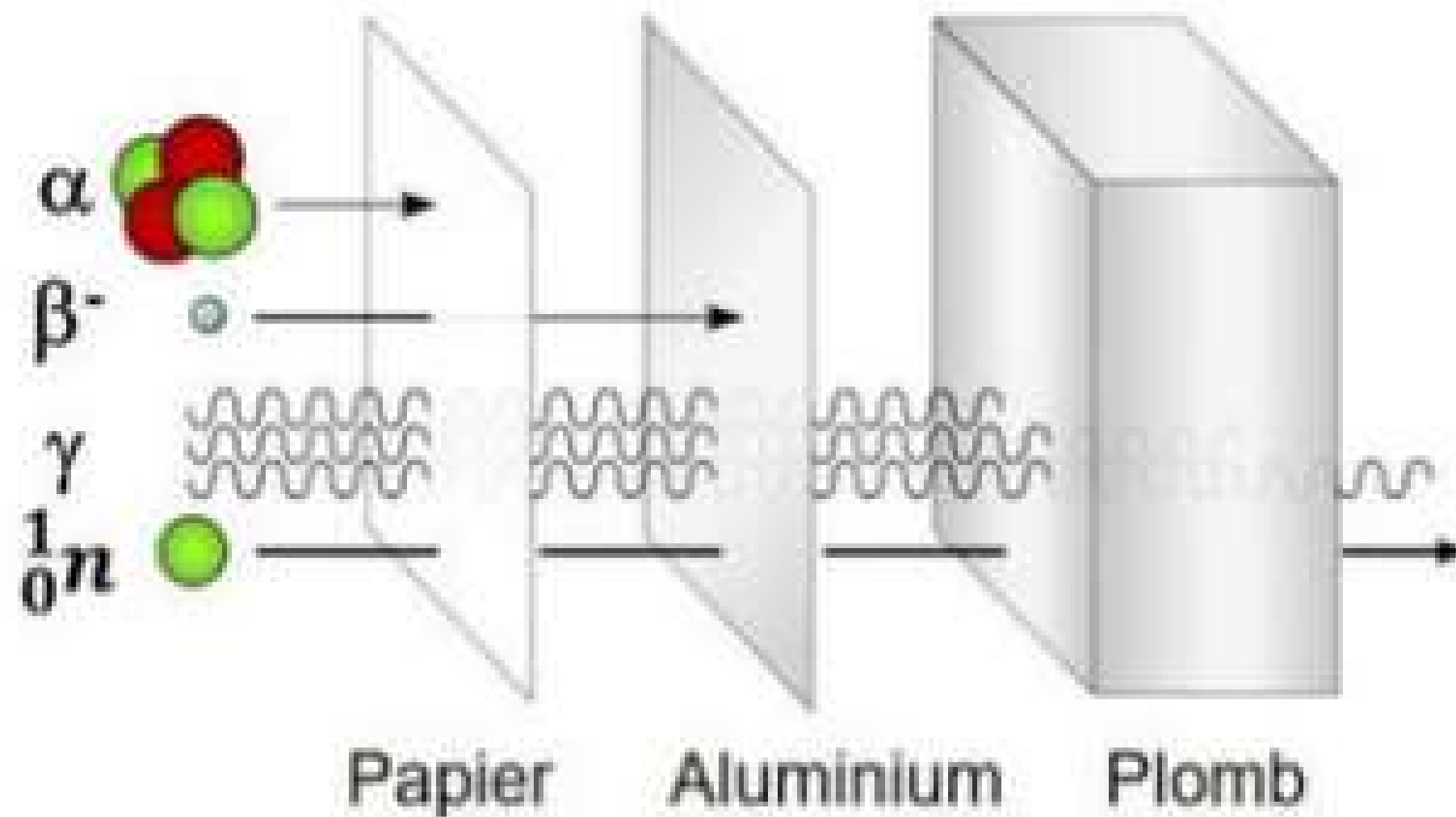
$\gamma; X; {}^1_0n$

- Indirectement ionisant
- Interactions non obligatoires
- Interactions balistiques (statistiques)

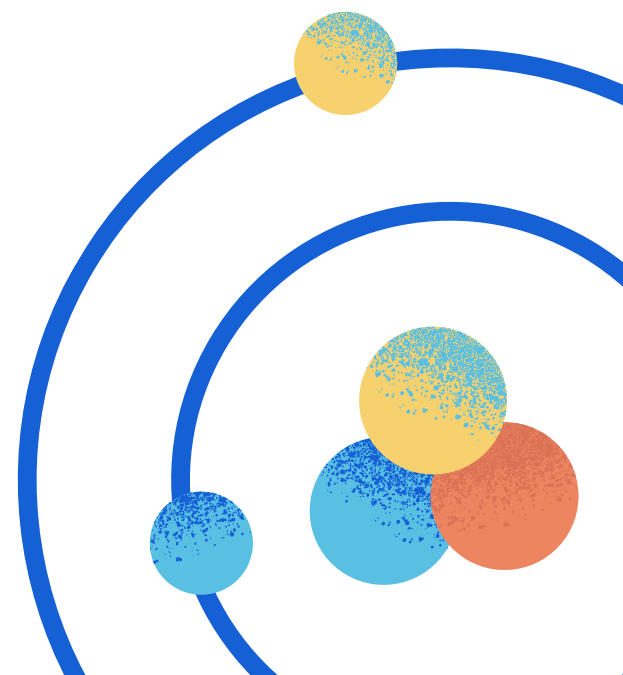
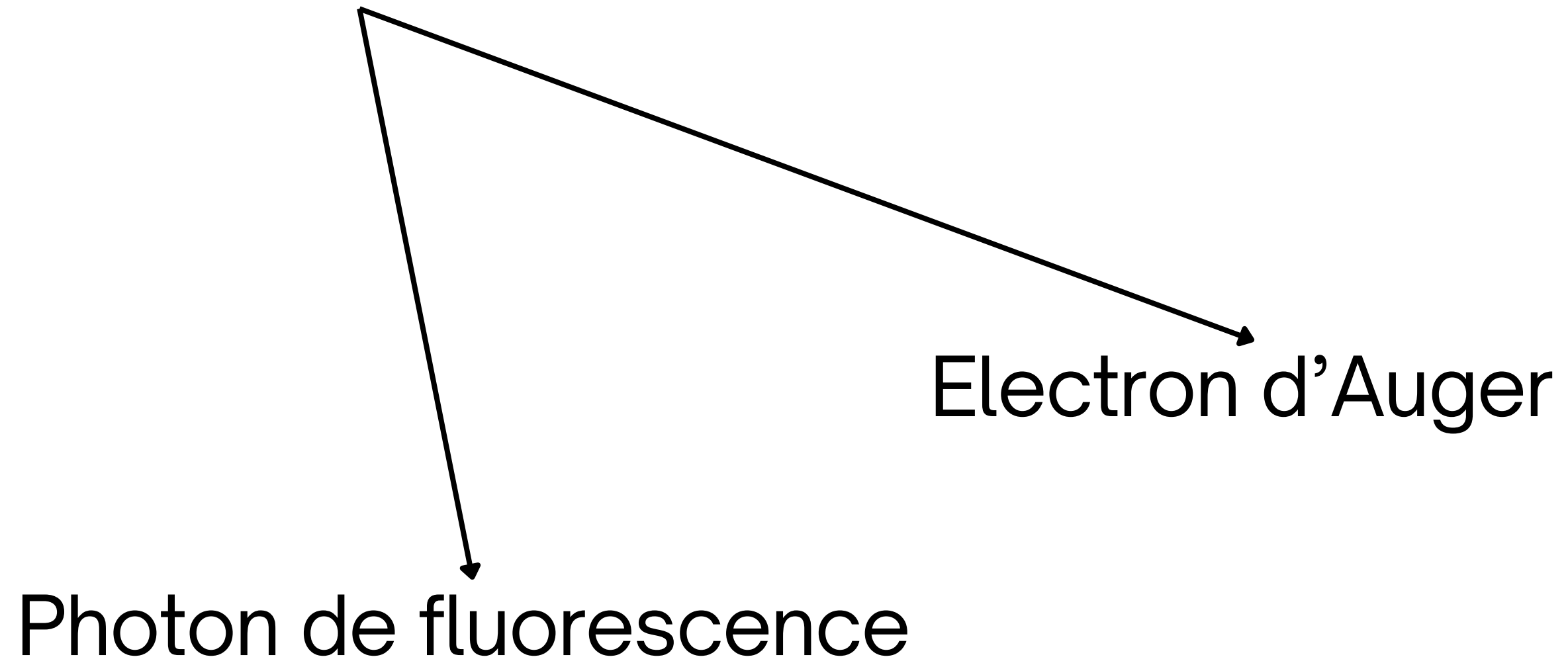


PENETRATION DANS LA MATIERE

Plus une particule est chargée, plus elle fera d'interaction donc plus vite elle sera arrêtée !

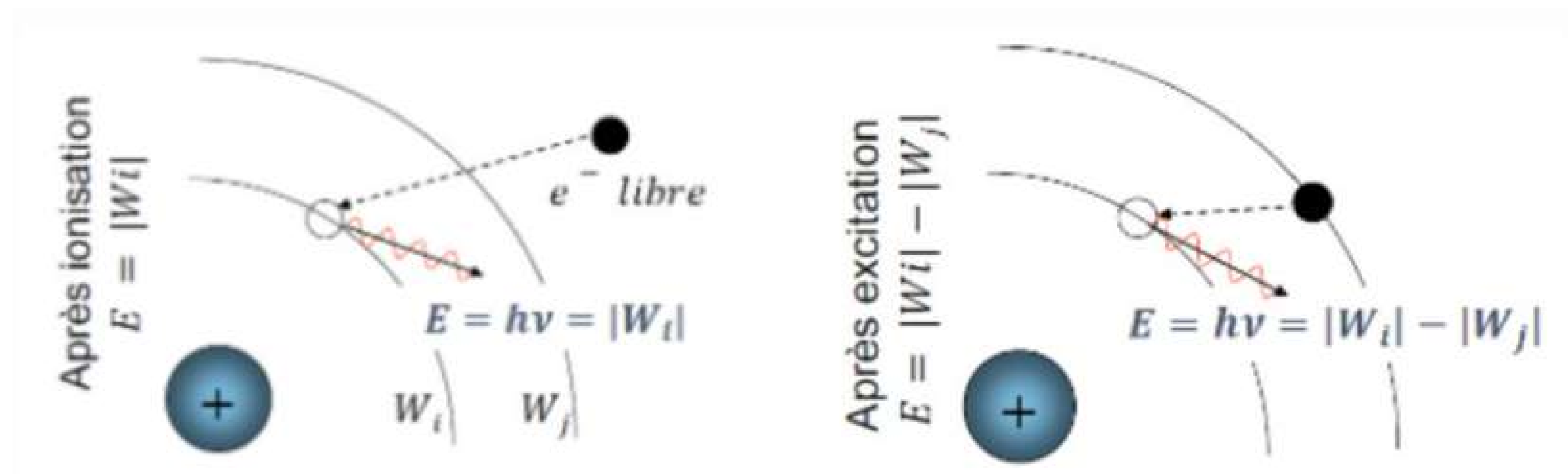


CONSEQUENCES DES INTERACTIONS



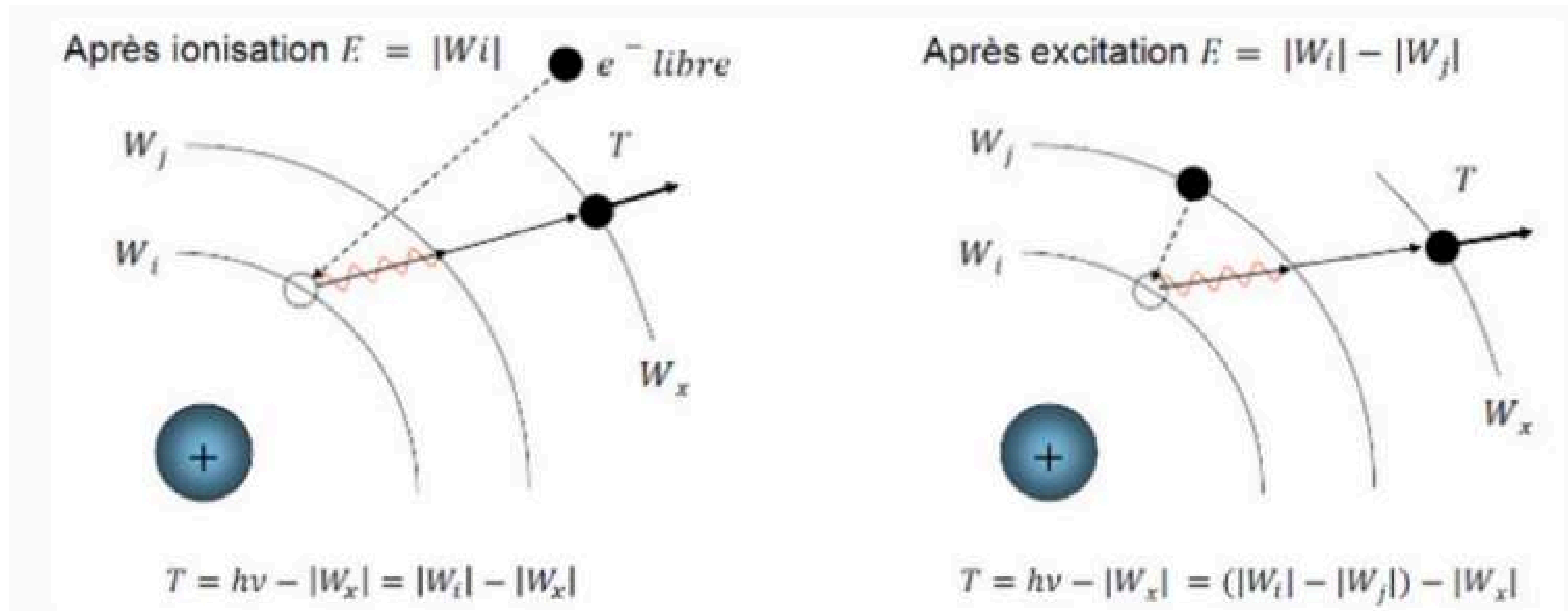
EMISSION D'UN PHOTON DE FLUORESCENCE

- L'atome possède un excès d'énergie → il va donc restituer cette énergie
- Retour à l'état fondamental dans un état stable
- Pour redescendre en énergie il libère un photon de fluorescence



EMISSION D'UN ELECTRON D'AUGER

- Photon de fluorescence \rightarrow ionise un électron plus périphérique \rightarrow électron d'Auger avec énergie cinétique



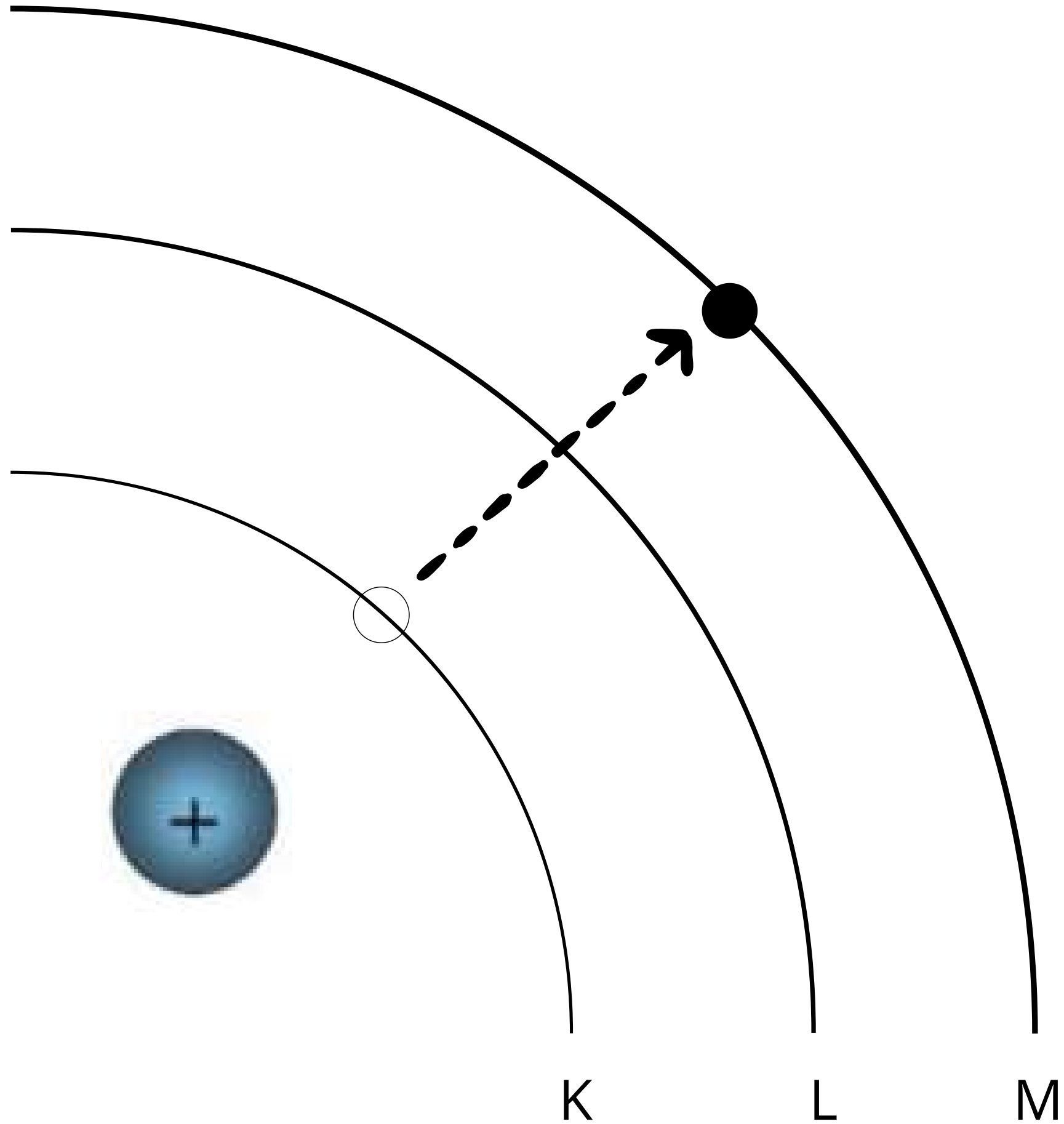
INSTANT QCM

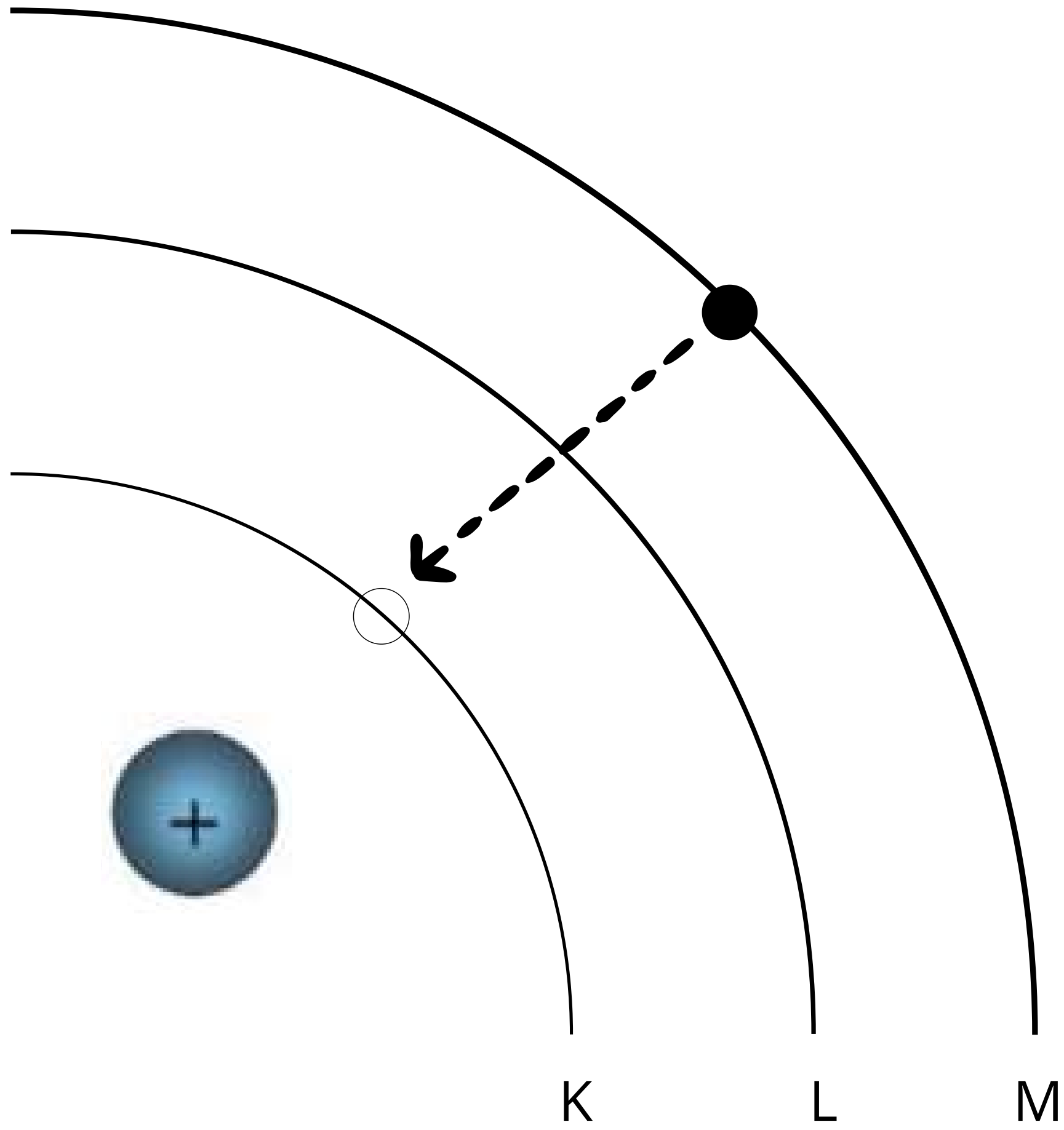
QCM 1 : On considère un atome dont les énergies des électrons selon le modèle de Bohr sont (en eV) : $|W_k| = 560$, $|W_l| = 230$ et $|W_m| = 70$. Cet atome subit une excitation d'un électron de la couche K vers la couche M. Parmi les phénomènes que l'on pourra observer, indiquez la (les) proposition(s) exacte(s) :

- A) Un photon de fluorescence de 70 eV
- B) Un photon de fluorescence de 160 eV
- C) Un électron Auger avec une énergie cinétique de 100 eV
- D) Un électron Auger avec une énergie cinétique de 420 eV
- E) Les propositions A, B, C et D sont fausses

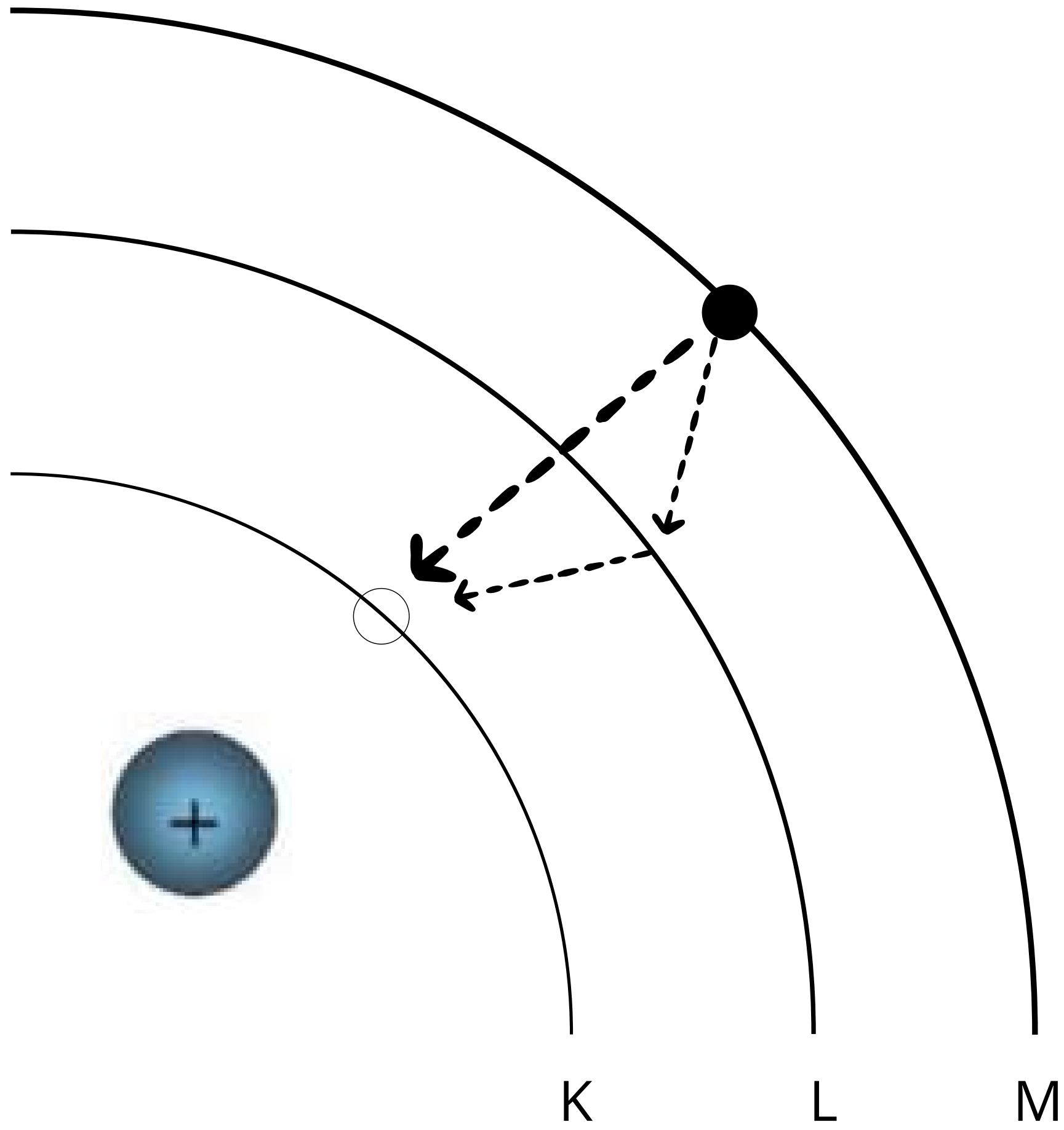


Excitation d'un électron :
couche K \rightarrow couche M



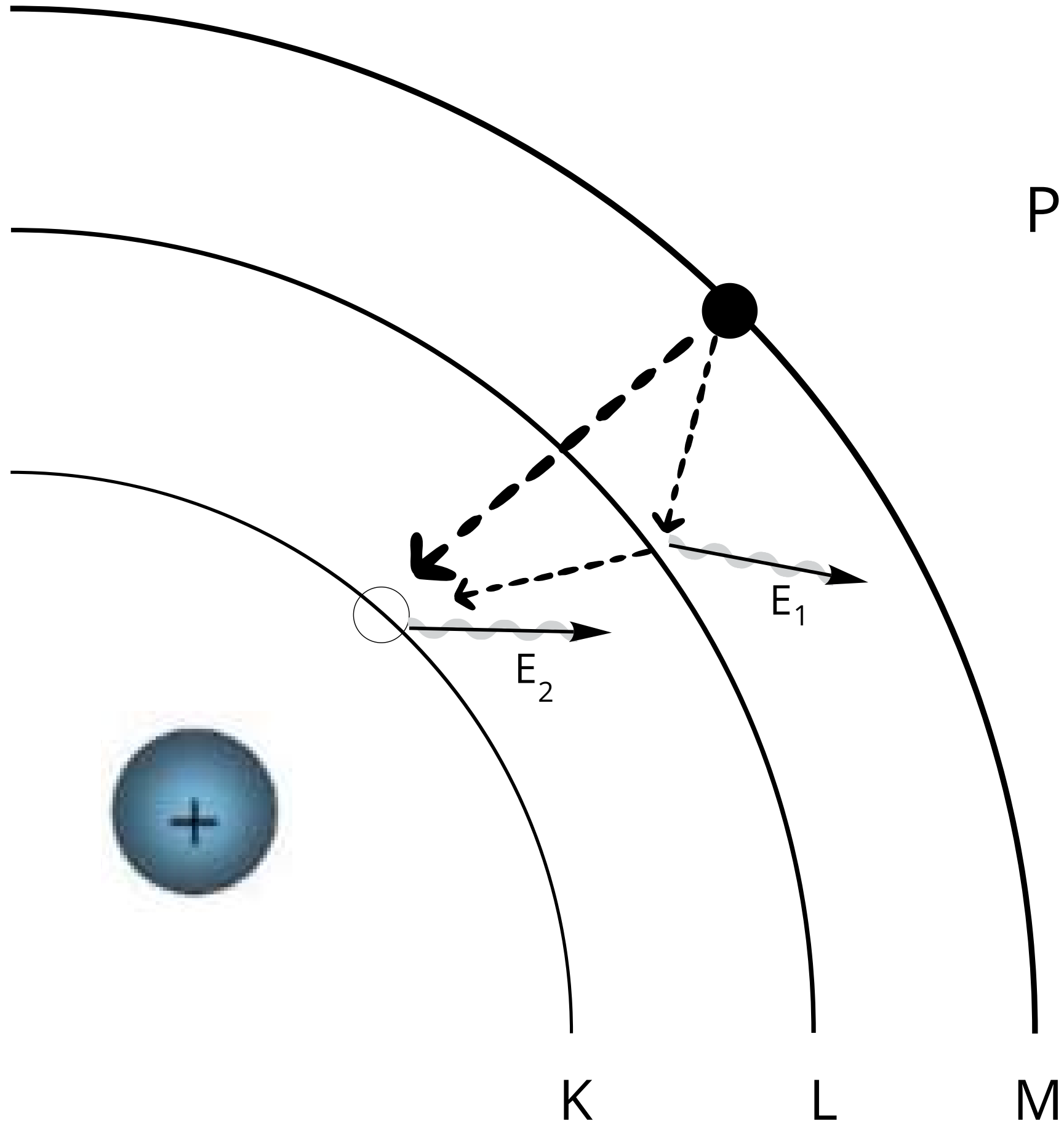


Désexcitation directe

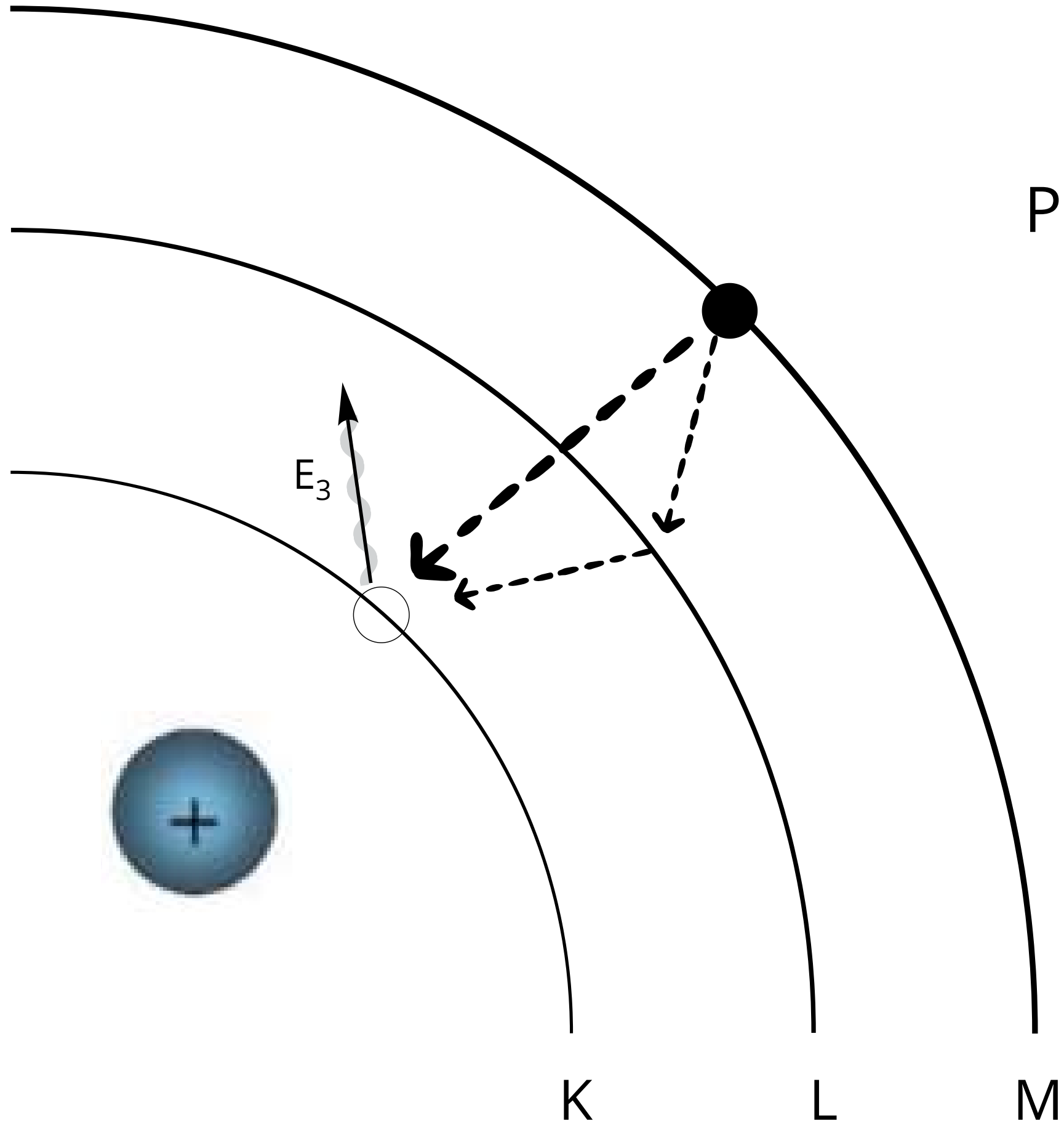


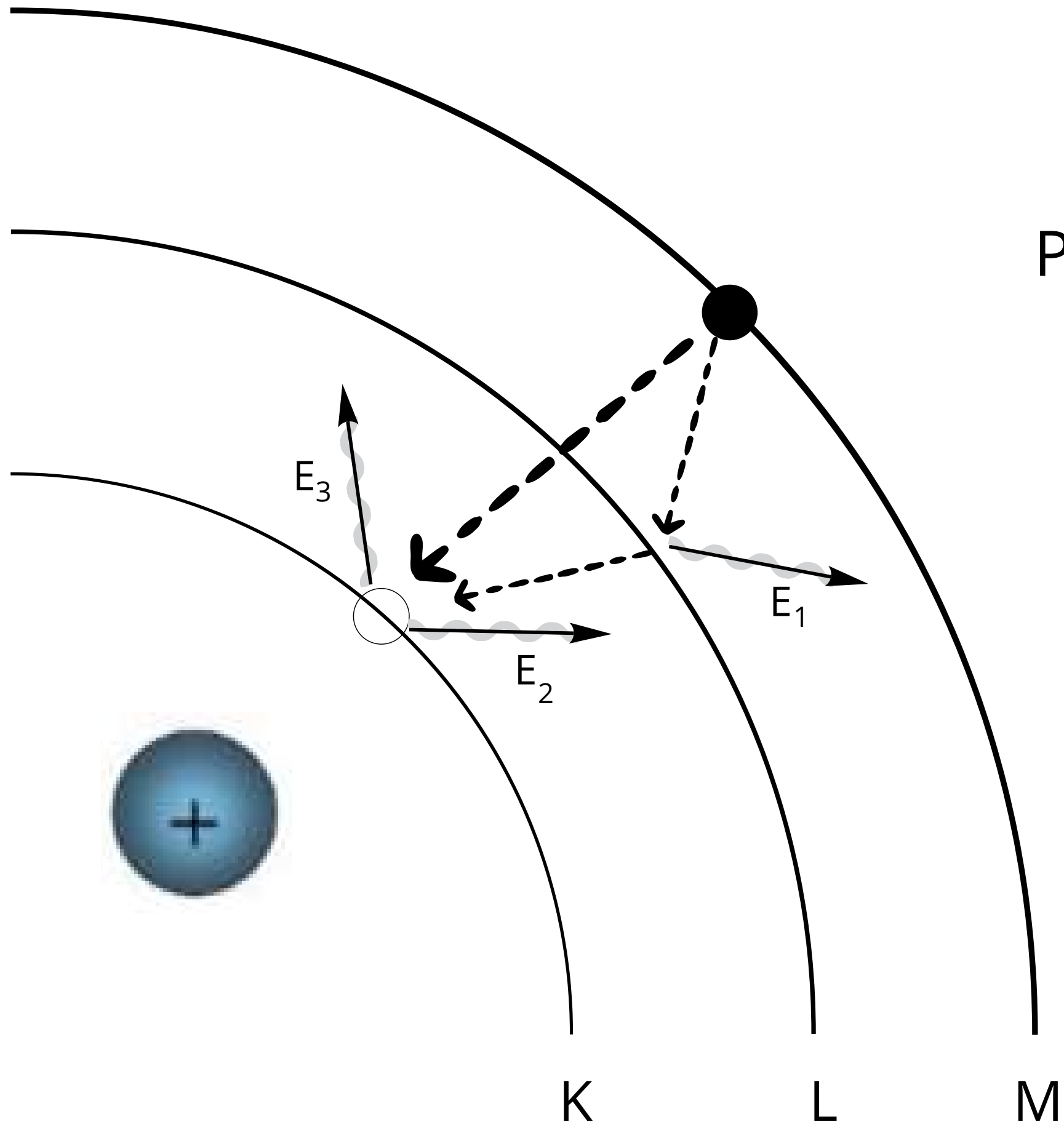
Désexcitation indirecte

Photon de fluorescence : désexcitation indirecte



Photon de fluorescence : désexcitation
directe





Photons de fluorescence possibles :

E_1 E_2 E_3

Photon de fluorescence M → L

$$E_1 = h\nu = |Wl| - |Wm|$$

$$E_1 = 230 - 70$$

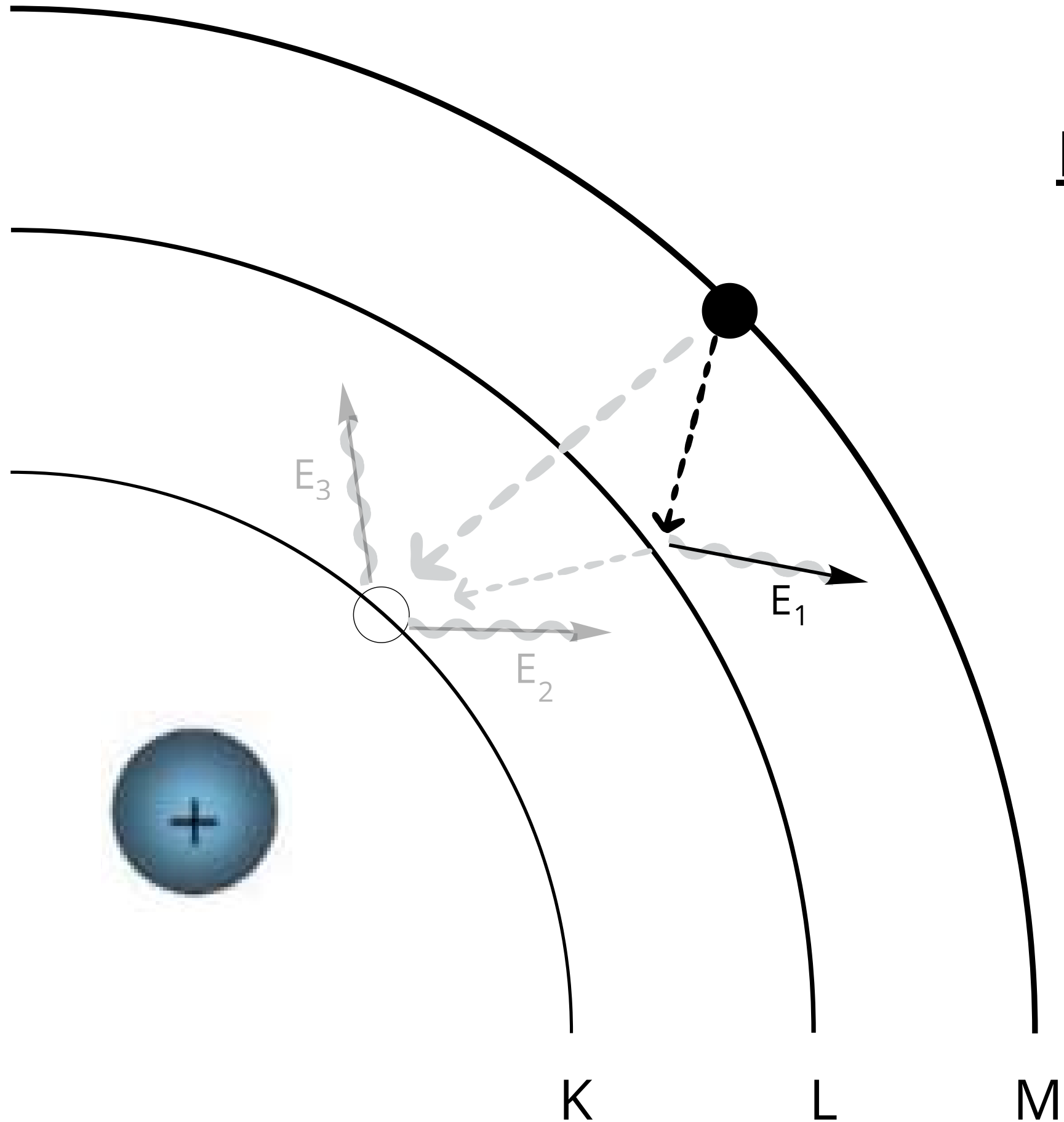
$$E_1 = 160 \text{ eV}$$

Energies de liaison électrons

$$|Wk| = 560 \text{ eV}$$

$$|Wl| = 230 \text{ eV}$$

$$|Wm| = 70 \text{ eV}$$



Photon de fluorescence L → K

$$E_2 = h\nu = |W_k| - |W_l|$$

$$E_2 = 560 - 230$$

$$E_2 = 330 \text{ eV}$$

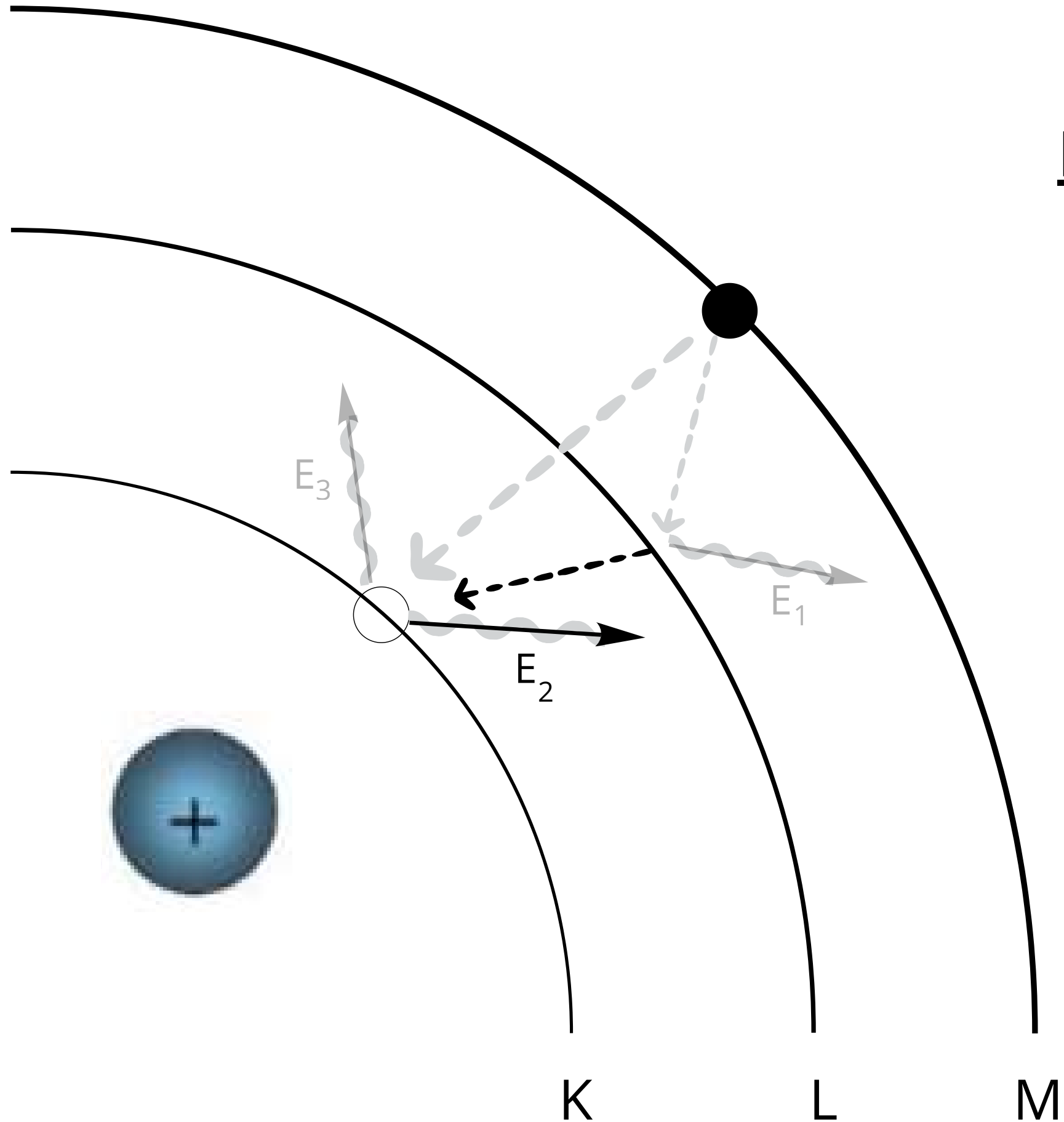
$$E_1 = 160 \text{ eV}$$

Energies de liaison électrons

$$|W_k| = 560 \text{ eV}$$

$$|W_l| = 230 \text{ eV}$$

$$|W_m| = 70 \text{ eV}$$



Photon de fluorescence M → K

$$E_3 = h\nu = |W_k| - |W_m|$$

$$E_3 = 560 - 70$$

$$E_3 = 490 \text{ eV}$$

Energies de liaison électrons

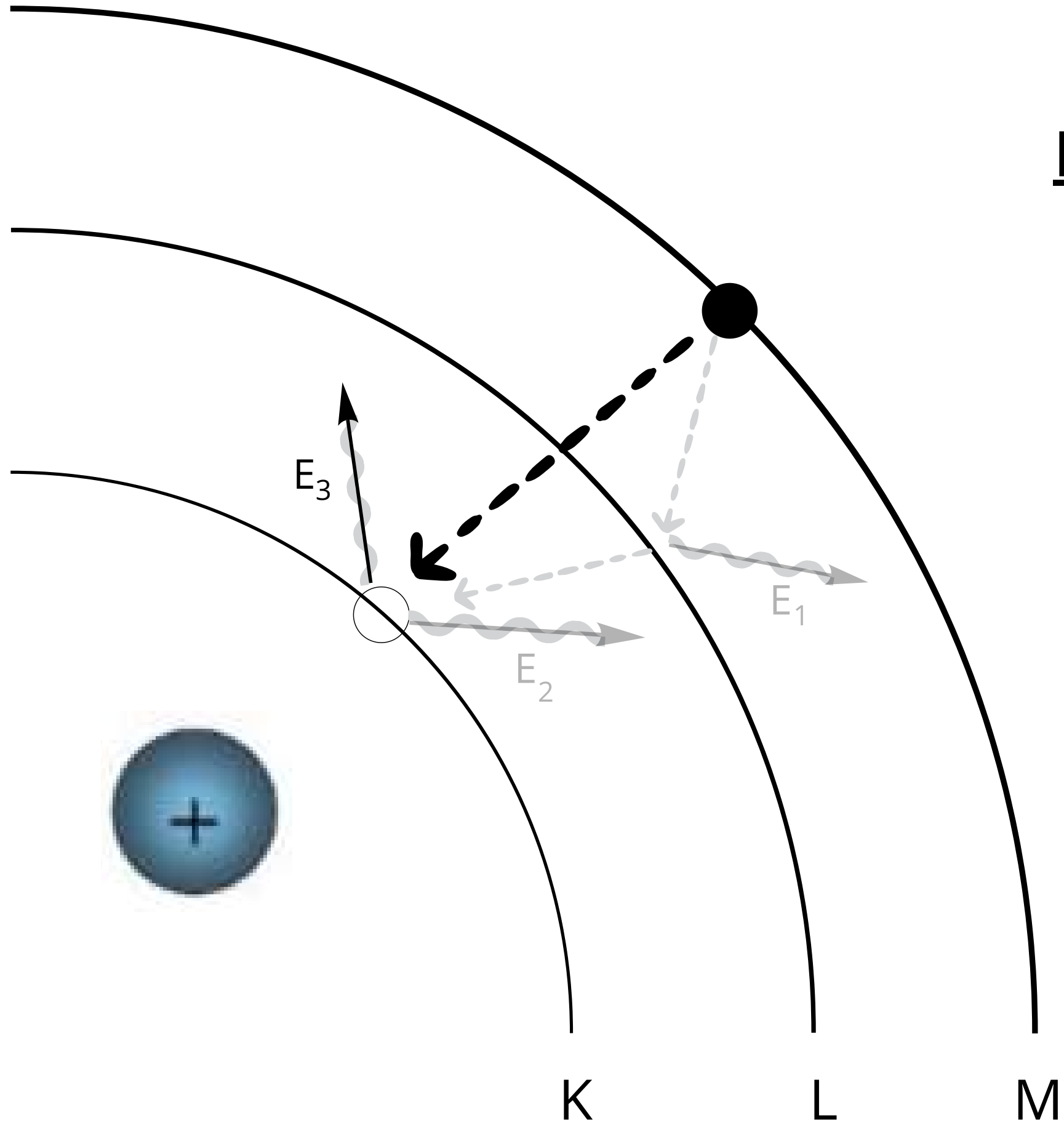
$$E_1 = 160 \text{ eV}$$

$$E_2 = 330 \text{ eV}$$

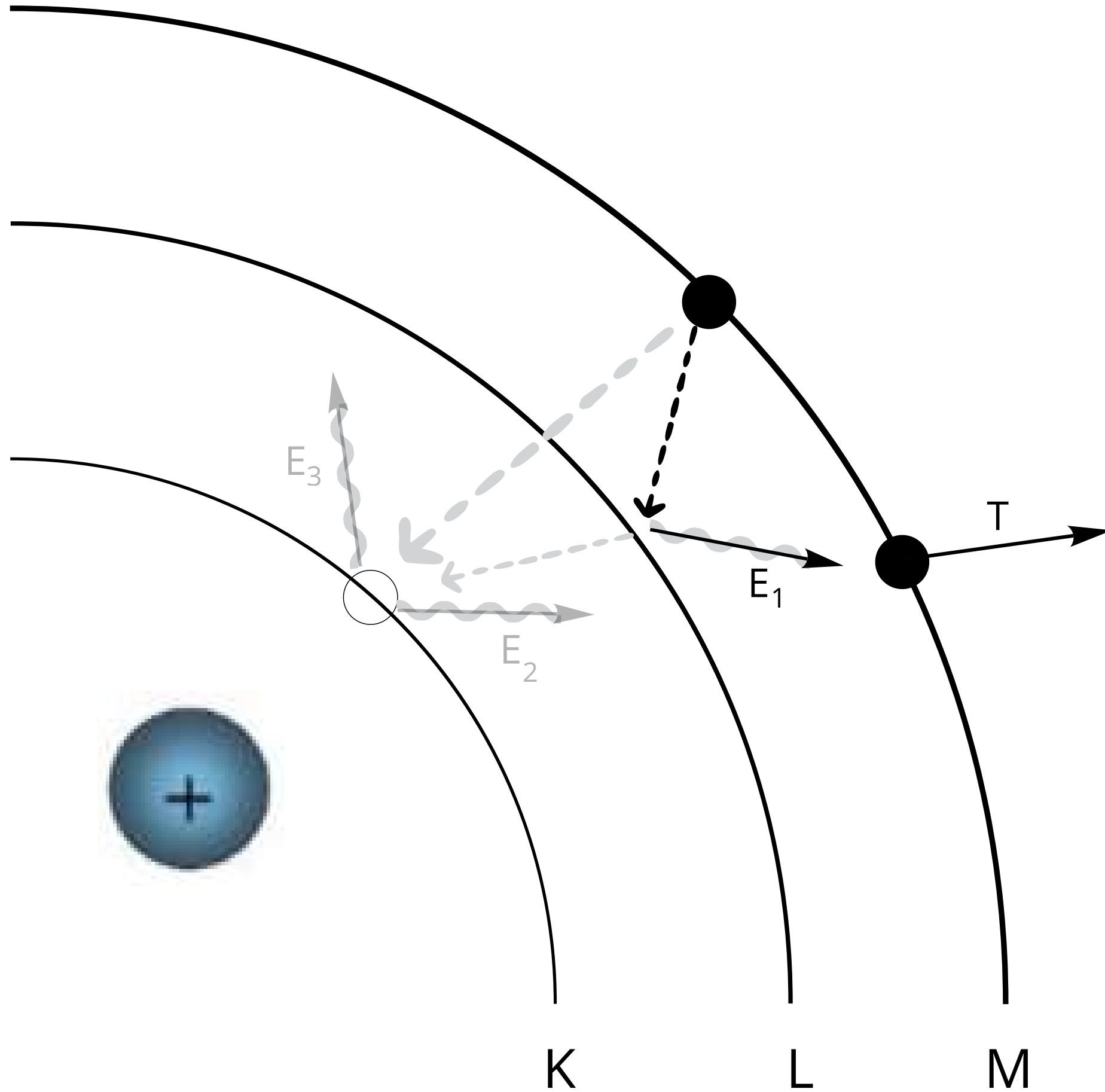
$$|W_k| = 560 \text{ eV}$$

$$|W_l| = 230 \text{ eV}$$

$$|W_m| = 70 \text{ eV}$$



Electron d'Auger:

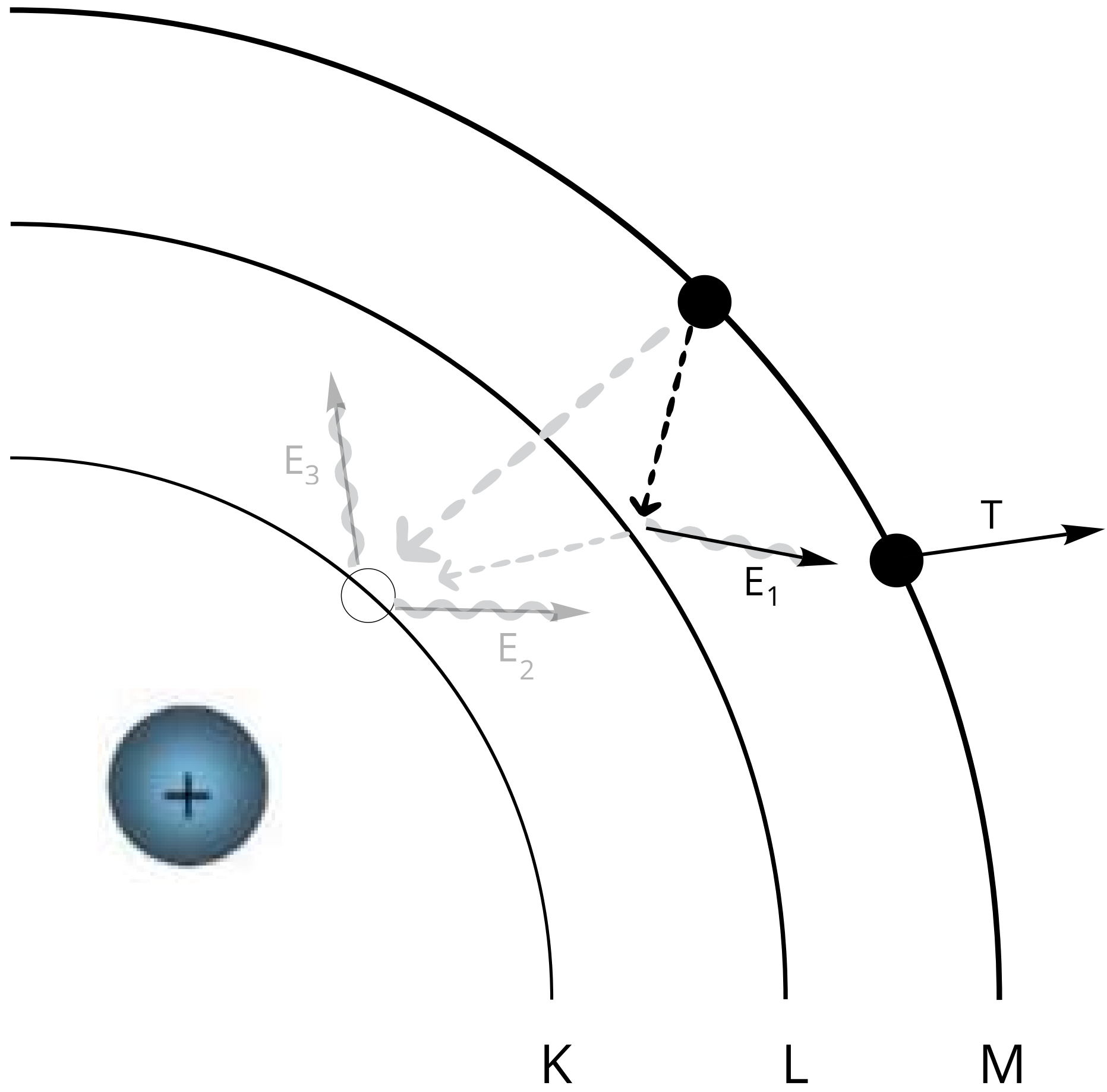


Electron d'Auger : couche M

$$T = E_1 - |W_m|$$

$$T = 160 - 70$$

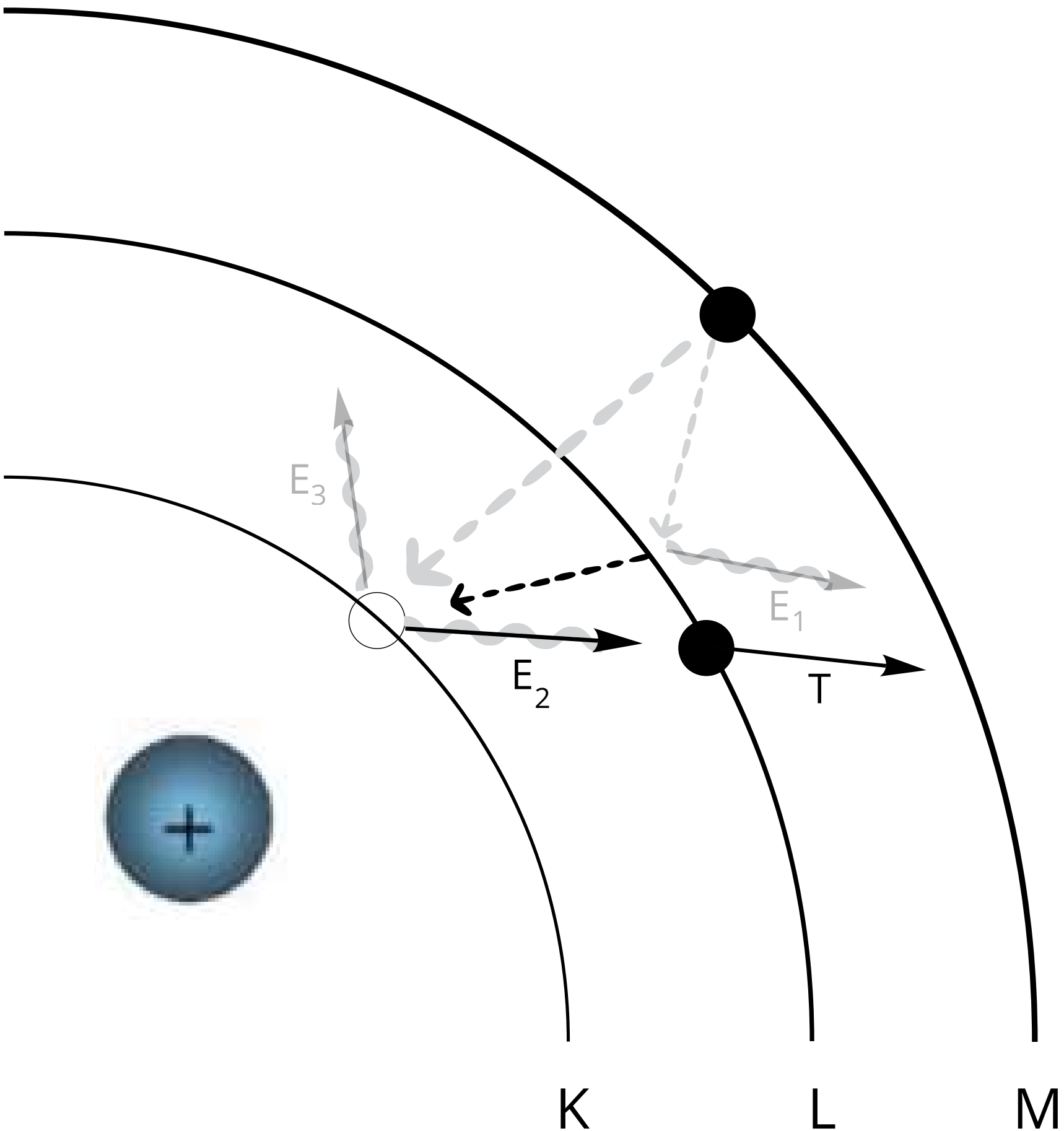
$$T = 90 \text{ eV}$$



- E₁ = 160 eV
- E₂ = 330 eV
- E₃ = 490 eV

Energies de liaison électrons

- |W_k| = 560 eV
- |W_l| = 230 eV
- |W_m| = 70 eV



Electron d'Auger : couche L

$$T = E_2 - |Wl|$$

$$T = 330 - 230$$

$$T = 100 \text{ eV}$$

- $E_1 = 160 \text{ eV}$
- $E_2 = 330 \text{ eV}$
- $E_3 = 490 \text{ eV}$

Energies de liaison électrons

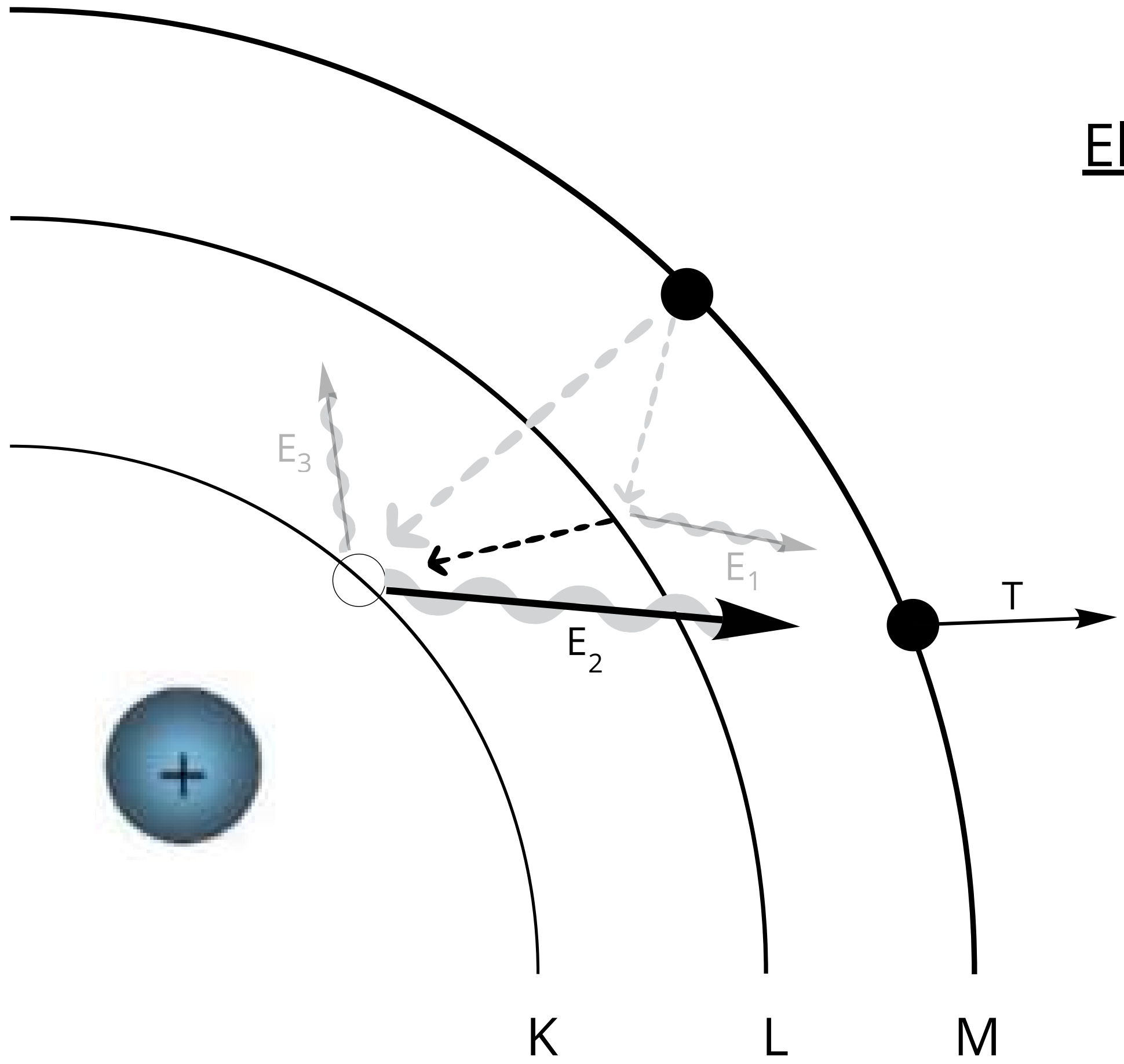
- $|Wk| = 560 \text{ eV}$
- $|Wl| = 230 \text{ eV}$
- $|Wm| = 70 \text{ eV}$

Electron d'Auger : couche M

$$T = E_2 - |W_m|$$

$$T = 330 - 70$$

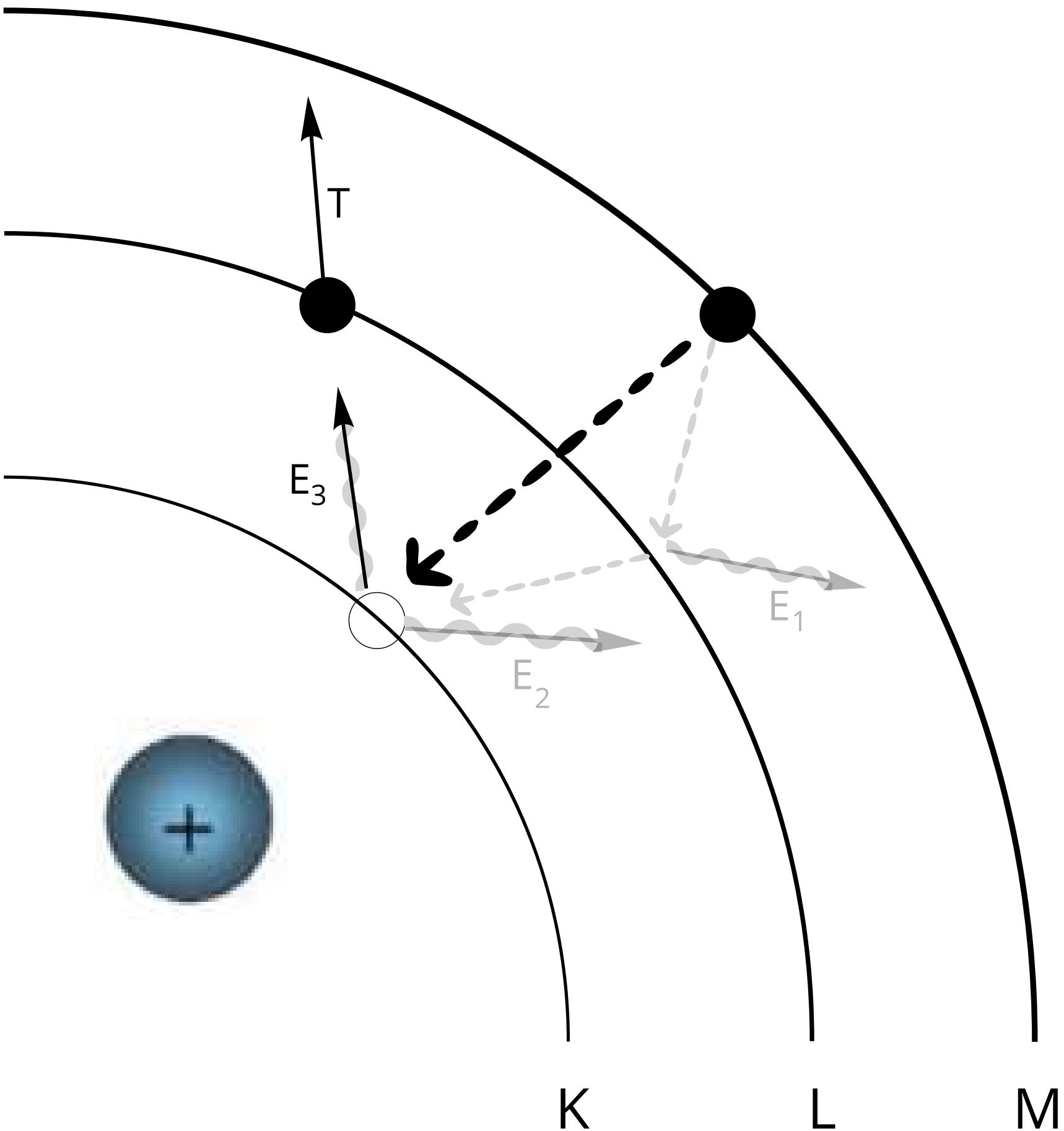
$$T = 260 \text{ eV}$$



- $E_1 = 160 \text{ eV}$
- $E_2 = 330 \text{ eV}$
- $E_3 = 490 \text{ eV}$

Energies de liaison électrons

- $|W_k| = 560 \text{ eV}$
- $|W_l| = 230 \text{ eV}$
- $|W_m| = 70 \text{ eV}$



Electron d'Auger : couche L

$$T = E_3 - |Wl|$$

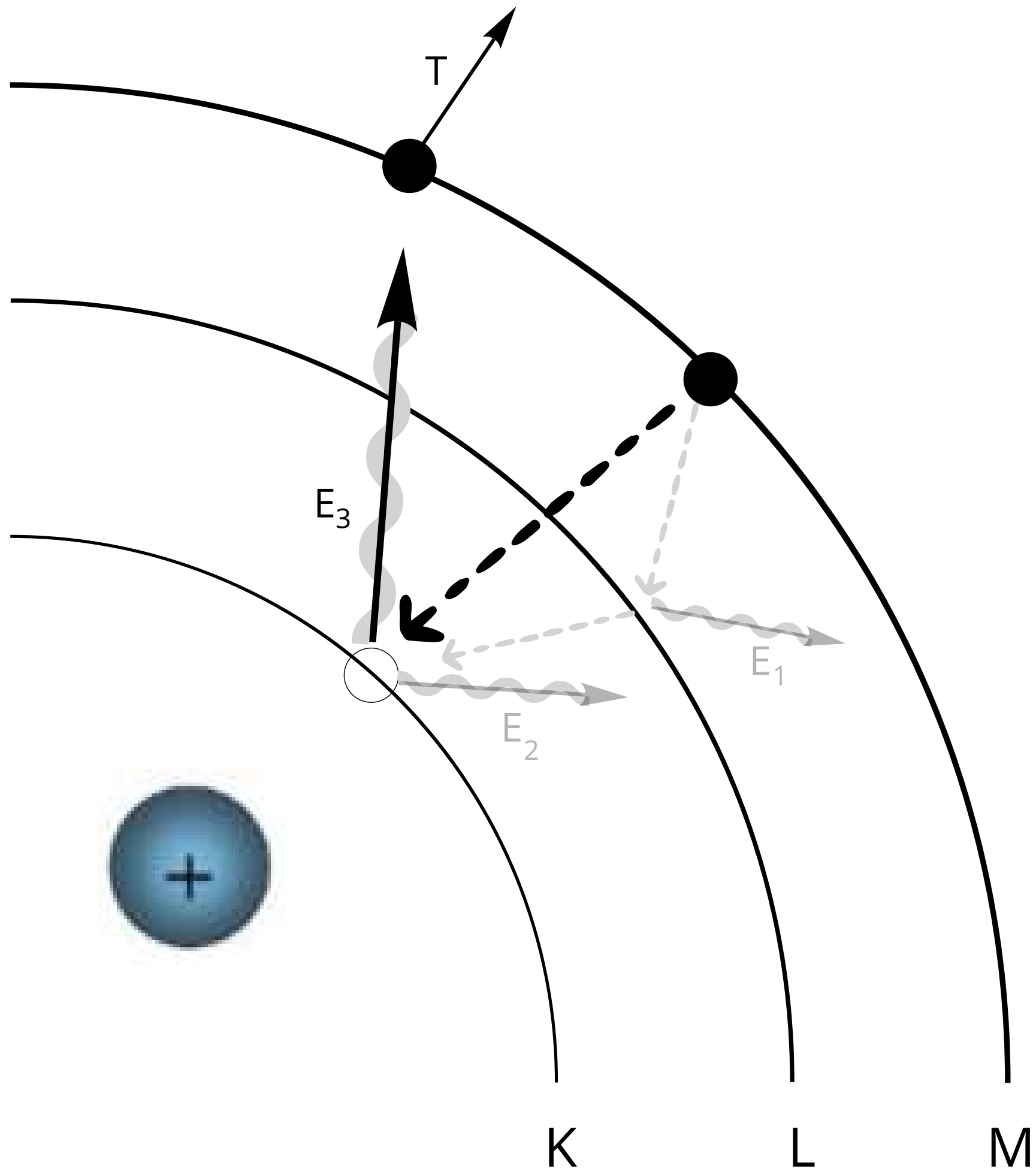
$$T = 490 - 230$$

$$T = 260 \text{ eV}$$

- $E_1 = 160 \text{ eV}$
- $E_2 = 330 \text{ eV}$
- $E_3 = 490 \text{ eV}$

Energies de liaison électrons

- $|Wk| = 560 \text{ eV}$
- $|Wl| = 230 \text{ eV}$
- $|Wm| = 70 \text{ eV}$



Electron d'Auger : couche M

$$T = E_3 - |W_m|$$

$$T = 490 - 70$$

$$T = 420 \text{ eV}$$

Energies de liaison électrons

$$E_1 = 160 \text{ eV}$$

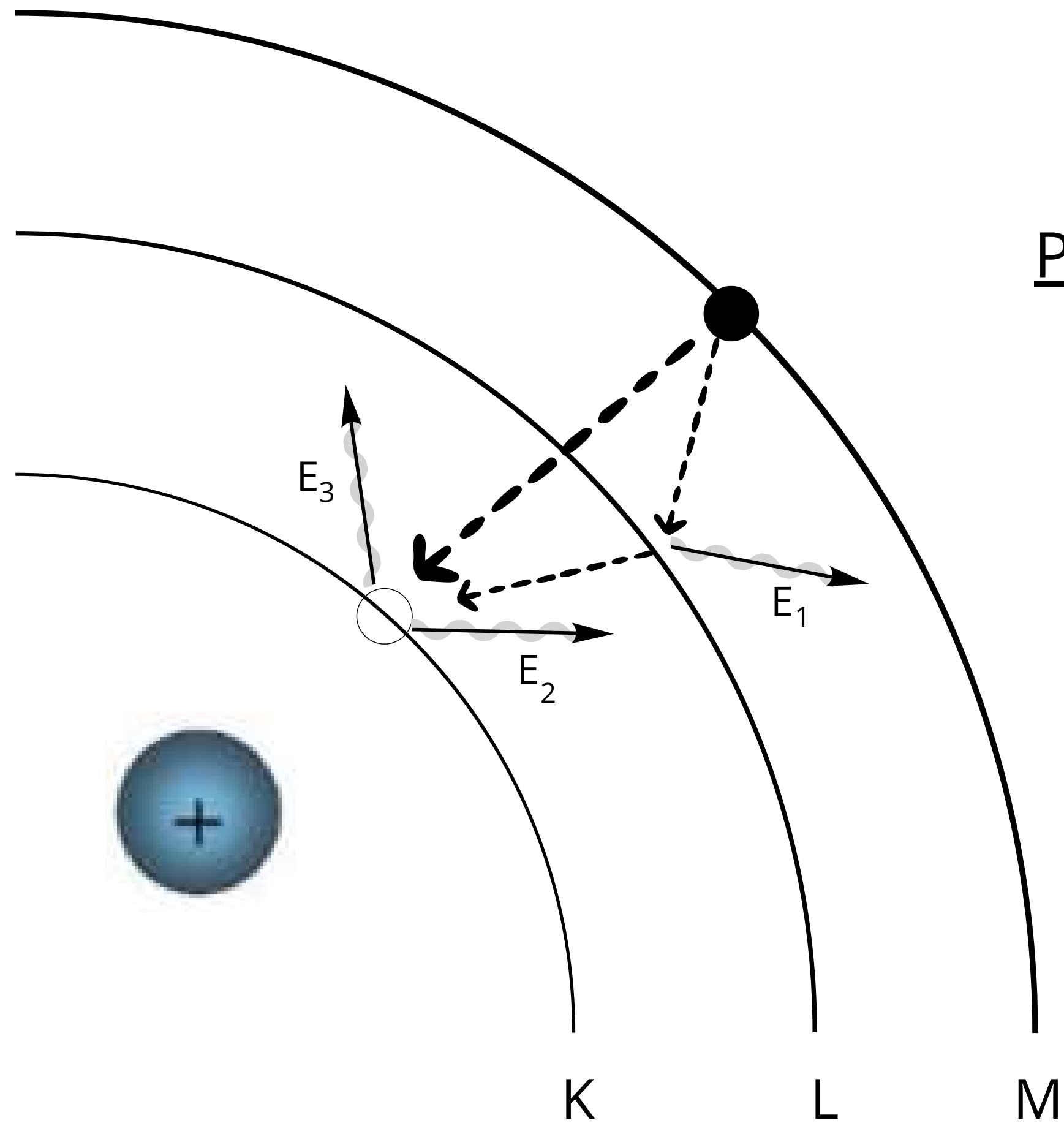
$$E_2 = 330 \text{ eV}$$

$$E_3 = 490 \text{ eV}$$

$$|W_k| = 560 \text{ eV}$$

$$|W_l| = 230 \text{ eV}$$

$$|W_m| = 70 \text{ eV}$$

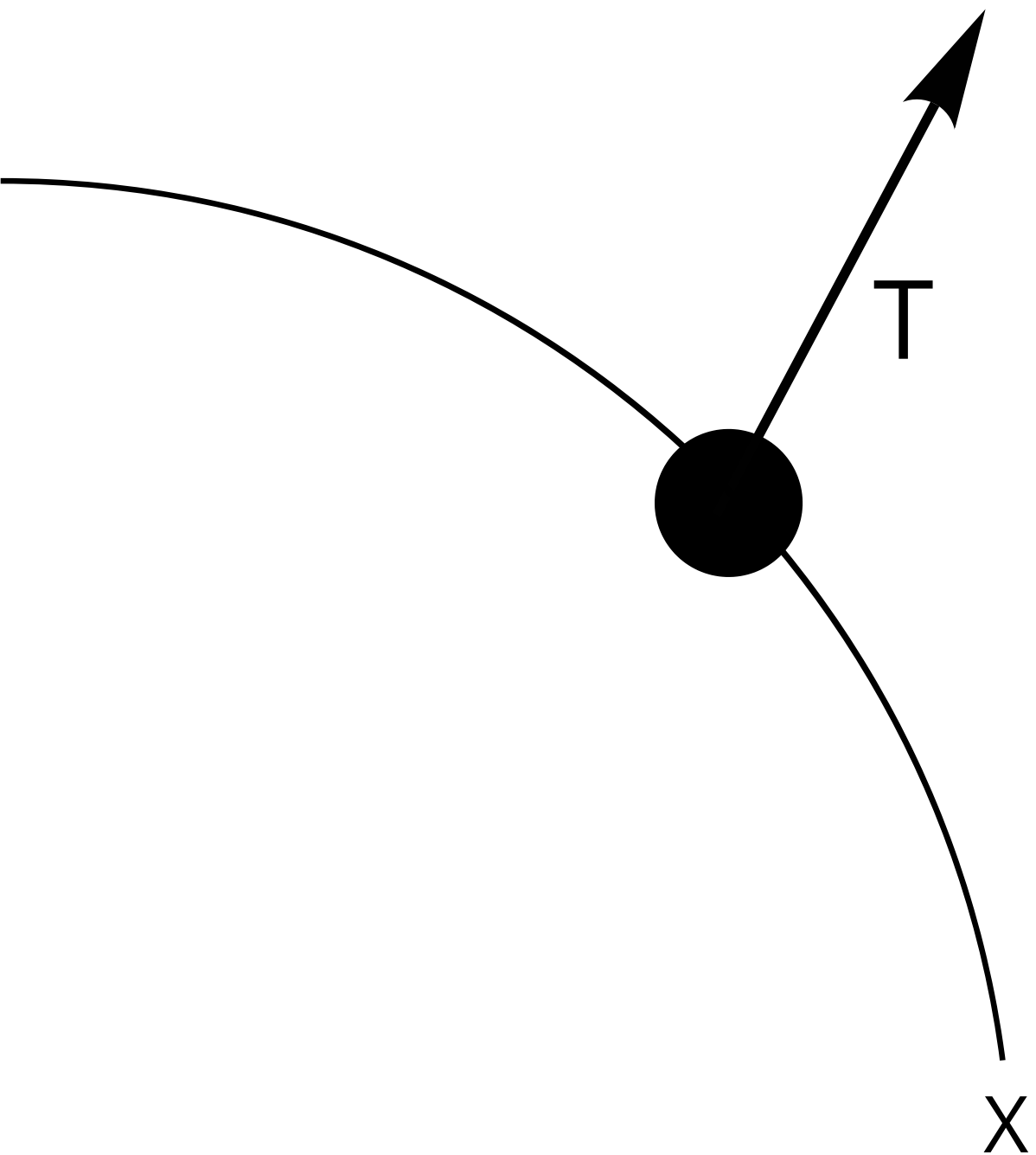


Photons de fluorescence possibles :

$$E_1 = 160 \text{ eV}$$

$$E_2 = 330 \text{ eV}$$

$$E_3 = 490 \text{ eV}$$



Energie cinétique des électrons d'Auger :

$$\begin{array}{l} T = 90 \text{ eV} \quad \rightarrow E_1 \\ T = 100 \text{ eV} \quad \left. \vphantom{\begin{array}{l} T = 90 \text{ eV} \\ T = 100 \text{ eV} \end{array}} \right\} \rightarrow E_2 \\ T = 260 \text{ eV} \\ T = 260 \text{ eV} \quad \left. \vphantom{\begin{array}{l} T = 260 \text{ eV} \\ T = 420 \text{ eV} \end{array}} \right\} \rightarrow E_3 \\ T = 420 \text{ eV} \end{array}$$

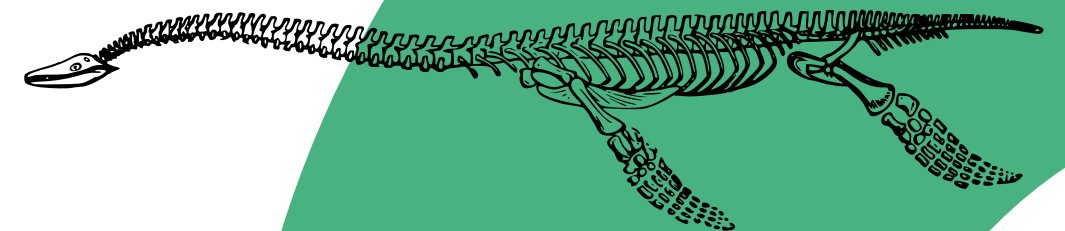
QCM 1 : On considère un atome dont les énergies des électrons selon le modèle de Bohr sont (en eV) : $|W_k| = 560$, $|W_l| = 230$ et $|W_m| = 70$. Cet atome subit une excitation d'un électron de la couche K vers la couche M. Parmi les phénomènes que l'on pourra observer, indiquez la (les) proposition(s) exacte(s) :

- A) Un photon de fluorescence de 70 eV
- B) Un photon de fluorescence de 160 eV
- C) Un électron Auger avec une énergie cinétique de 100 eV
- D) Un électron Auger avec une énergie cinétique de 420 eV
- E) Les propositions A, B, C et D sont fausses

A VOUS DE JOUER !

QCM : Les énergies des électrons de l'atome de carbone ($Z = 6$) sont égales, dans le modèle de Bohr, à $- 284 \text{ eV}$ pour la couche K et $- 30 \text{ eV}$ pour la couche L. Quelle(s) est (sont) l'(les) émission(s) que l'on peut observer après une ionisation de la couche K de cet atome ?

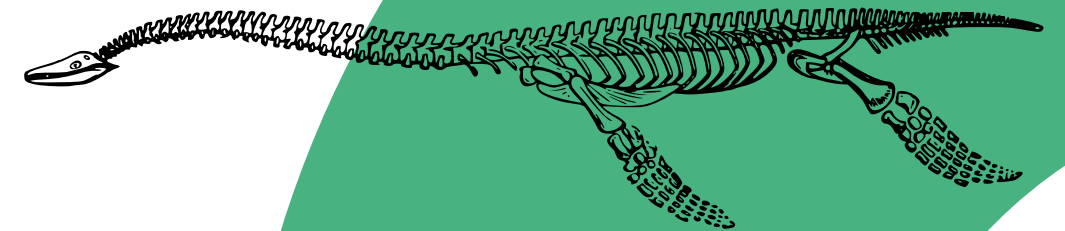
- A) Un photon de fluorescence de 30 eV
- B) Un photon de fluorescence de 254 eV
- C) Un électron Auger de 254 eV
- D) Un électron Auger de 284 eV
- E) Les propositions A, B, C et D sont fausses



A VOUS DE JOUER !

QCM : Les énergies des électrons de l'atome de carbone ($Z = 6$) sont égales, dans le modèle de Bohr, à $- 284 \text{ eV}$ pour la couche K et $- 30 \text{ eV}$ pour la couche L. Quelle(s) est (sont) l'(les) émission(s) que l'on peut observer après une ionisation de la couche K de cet atome ?

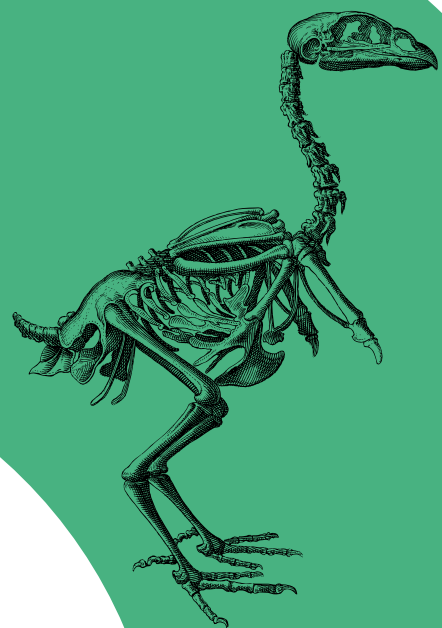
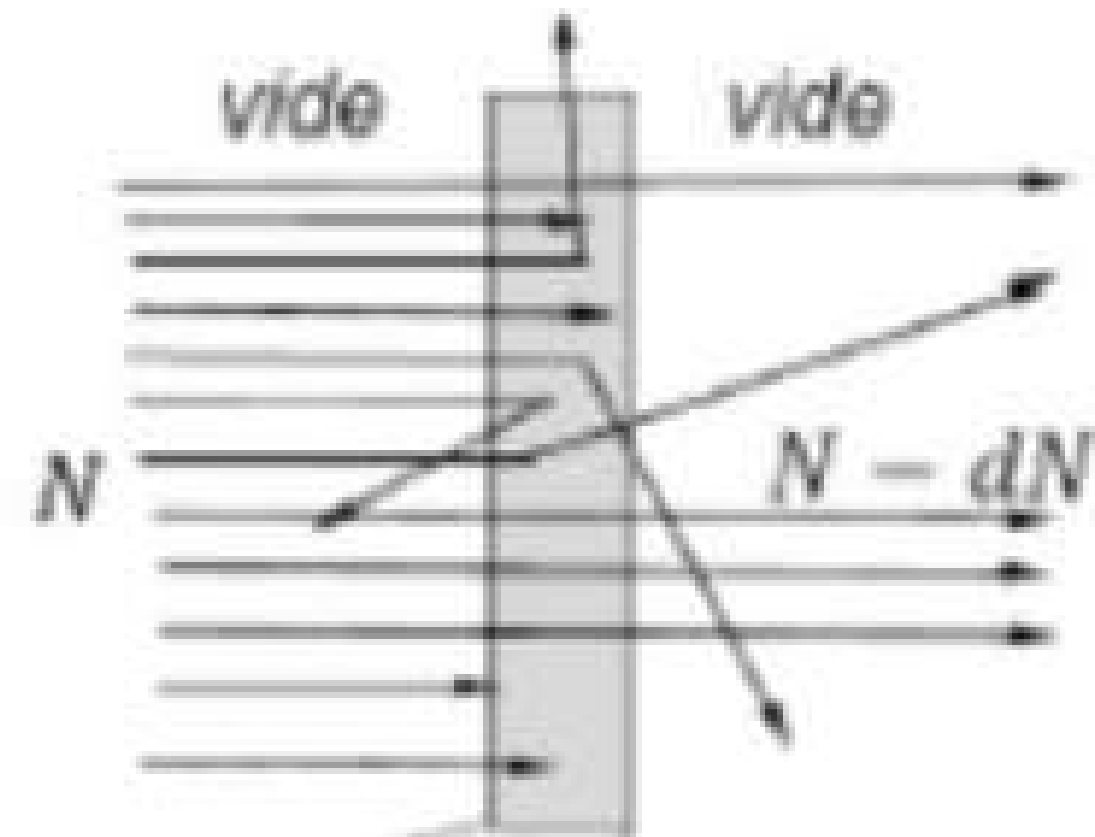
- A) Un photon de fluorescence de 30 eV
- B) Un photon de fluorescence de 254 eV
- C) Un électron Auger de 254 eV
- D) Un électron Auger de 284 eV
- E) Les propositions A, B, C et D sont fausses



ATTENUATION DES PHOTONS

Flux de photon dans la matière :

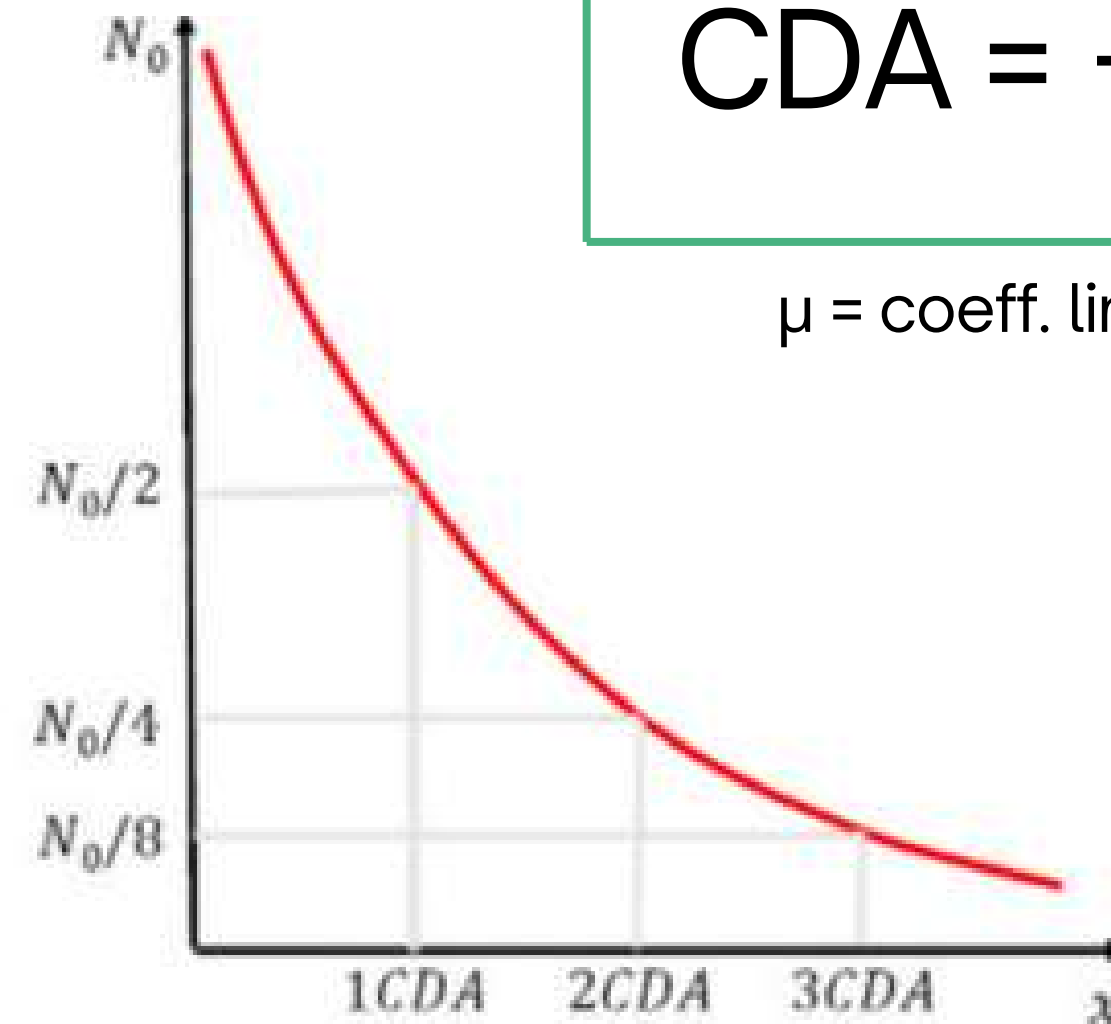
- Absorbé
- Diffusé (dévié)
- Transmis (traverse sans interagir)



COUCHE DE DEMI-ATTENUATION

→ L'épaisseur x qui diminue le flux de photon incident d'un *facteur 2*

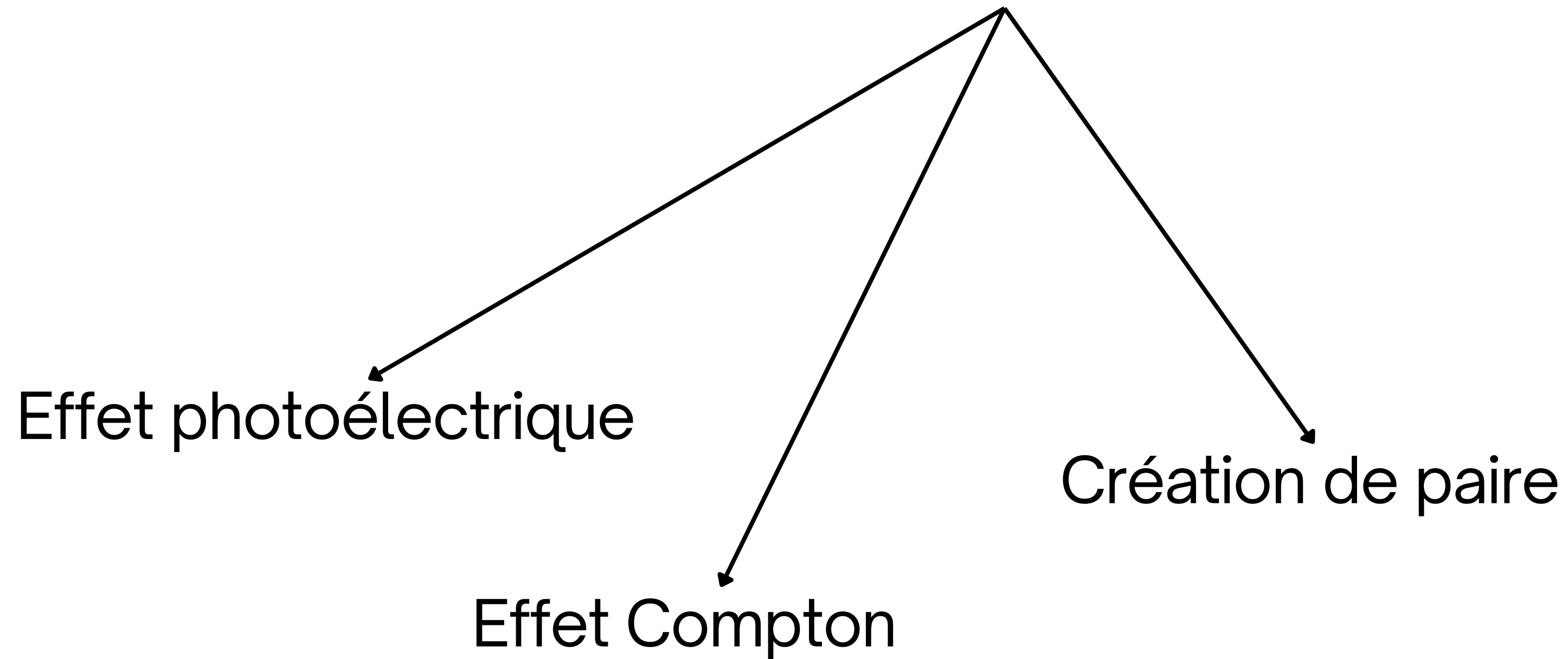
x	$N(x)/N(0)$	%
$1 \times CDA$	$1/2$	50
$2 \times CDA$	$(1/2)^2$	25
$3 \times CDA$	$(1/2)^3$	12,5
$n \times CDA$	$(1/2)^n$	
$10 \times CDA$	$1/1024$	0,1



$$CDA = \frac{\ln 2}{\mu}$$

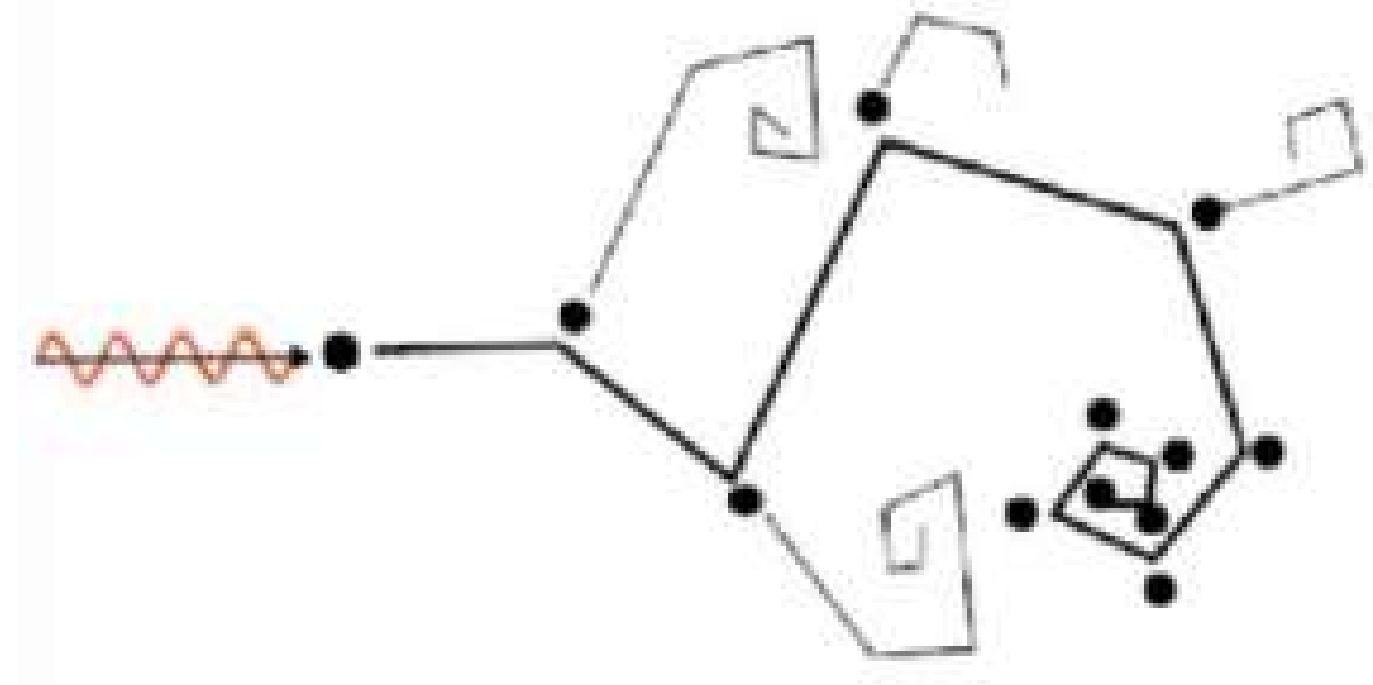
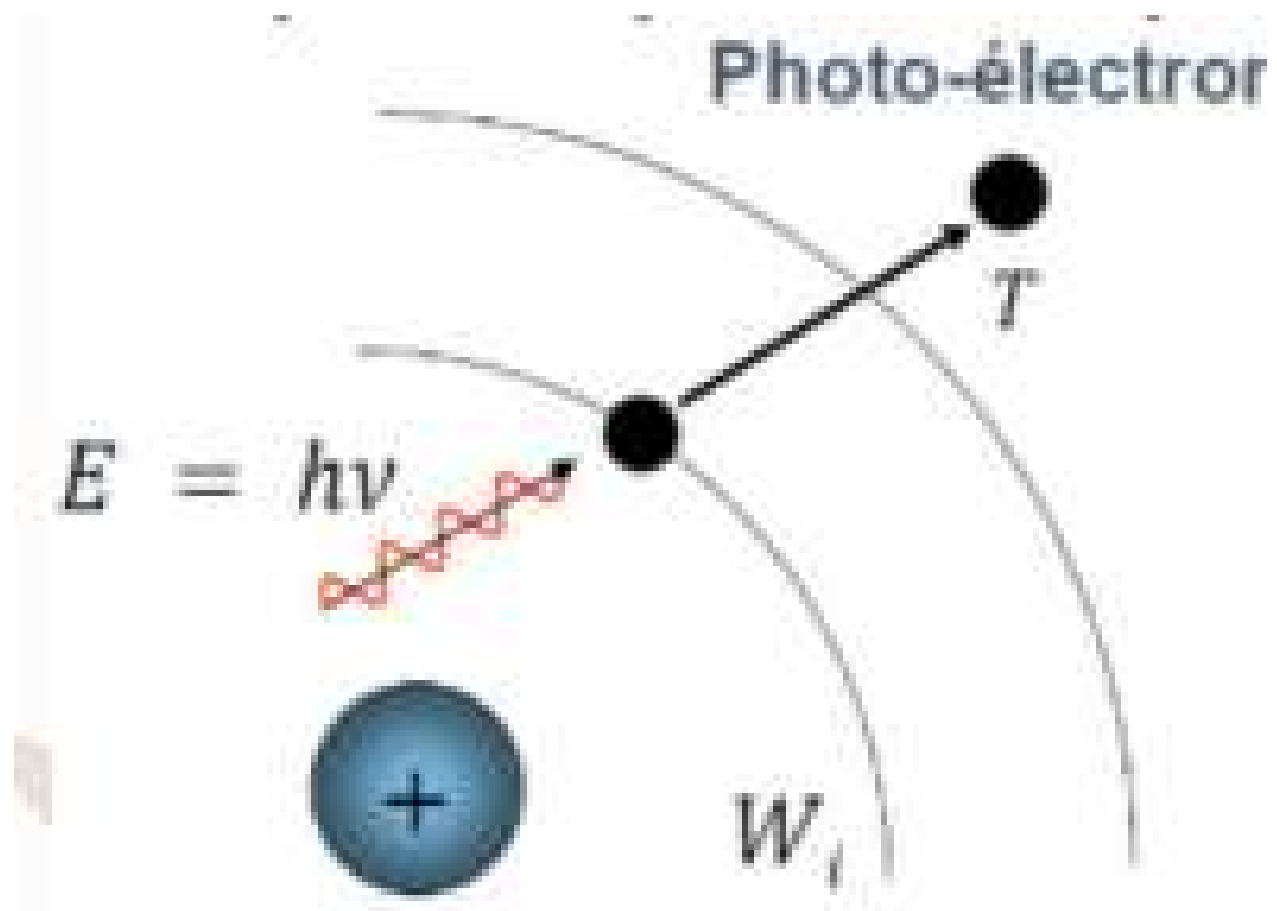
μ = coeff. linéique d'atténuation

MECANISMES D'INTERACTION DES PHOTONS



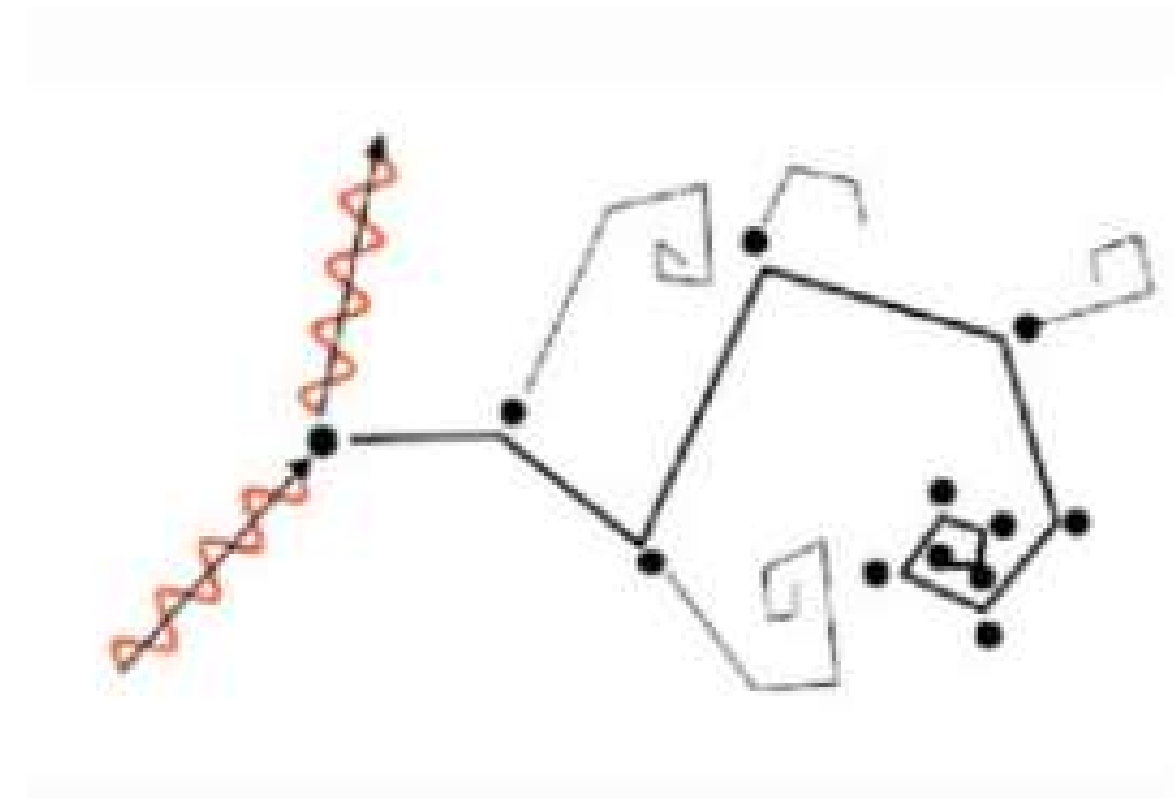
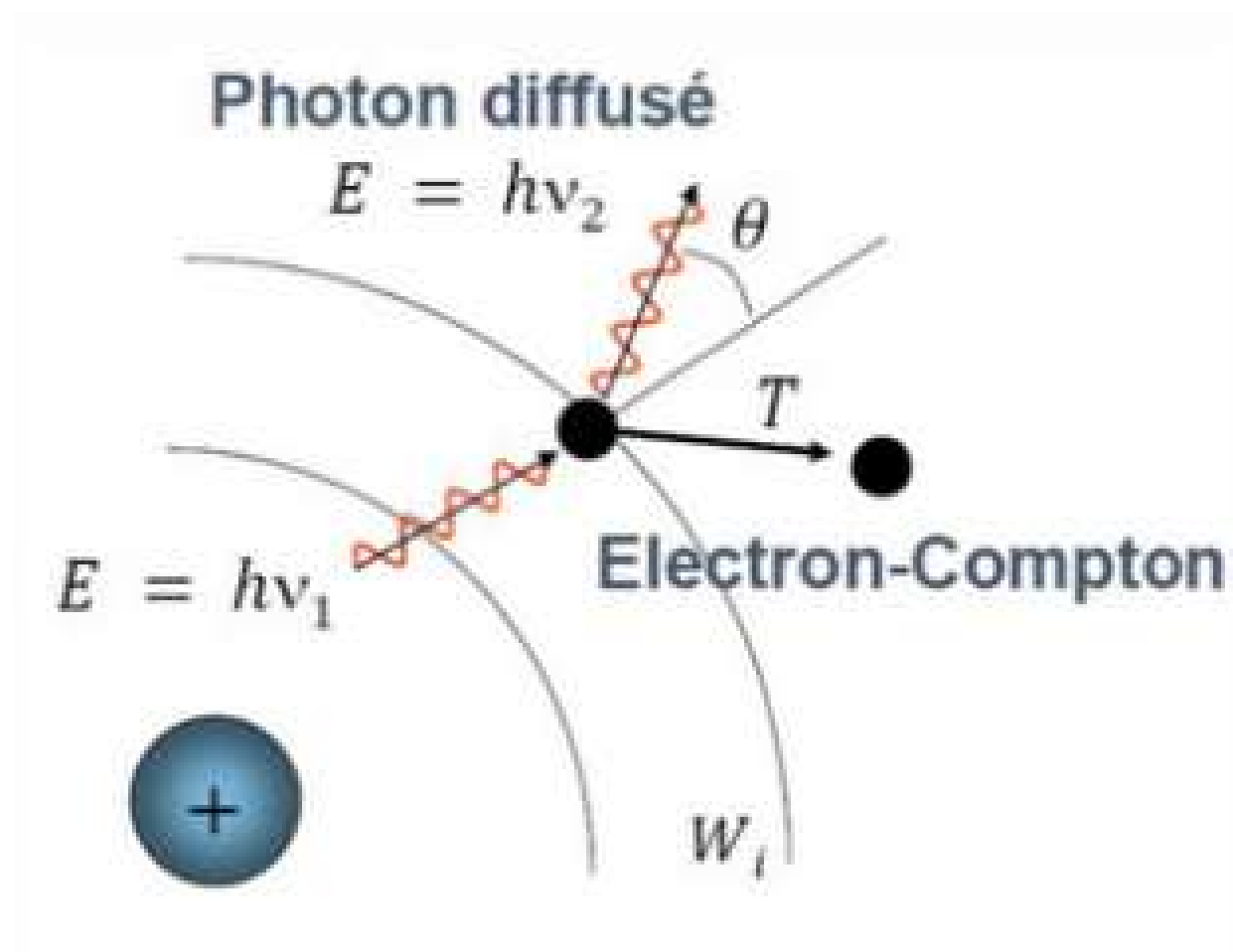
EFFET PHOTOELECTRIQUE

- Transfert de la TOTALITE de l'énergie du photon
- Expulsion du photon-électron : $T = h\nu - |W_i|$
- Les conséquences
 - pour l'atome : case vacante + excès d'énergie → réarrangement
 - pour l'électron ionisé : parcours dans la matière jusqu'à épuisement
 - pour le photon : disparition



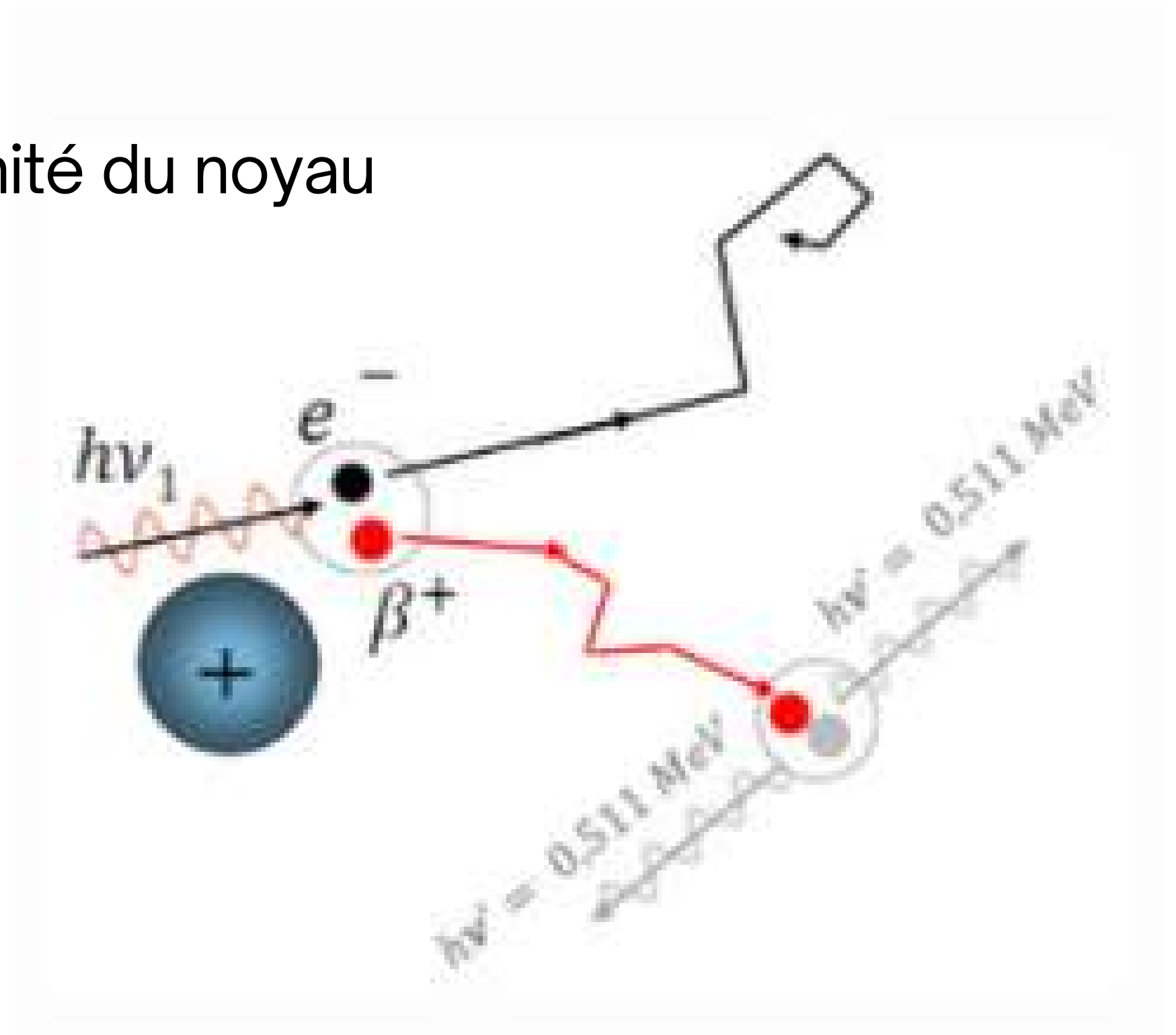
EFFET COMPTON

- Transfert d'une PARTIE de l'énergie du photon
- Répartition de l'E : E_c de l'électron Compton + E consommée pour l'arracher + E photon diffusé
- Les conséquences
 - pour l'atome : case vacante + excès d'énergie → réarrangement
 - pour l'électron ionisé : parcours dans la matière jusqu'à épuisement
 - pour le photon : une partie est déviée

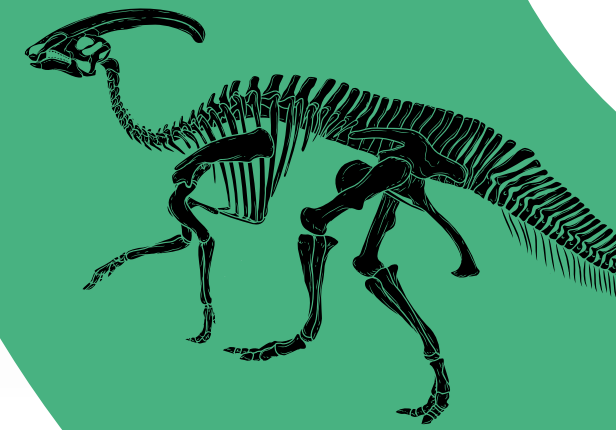


CREATION DE PAIRE

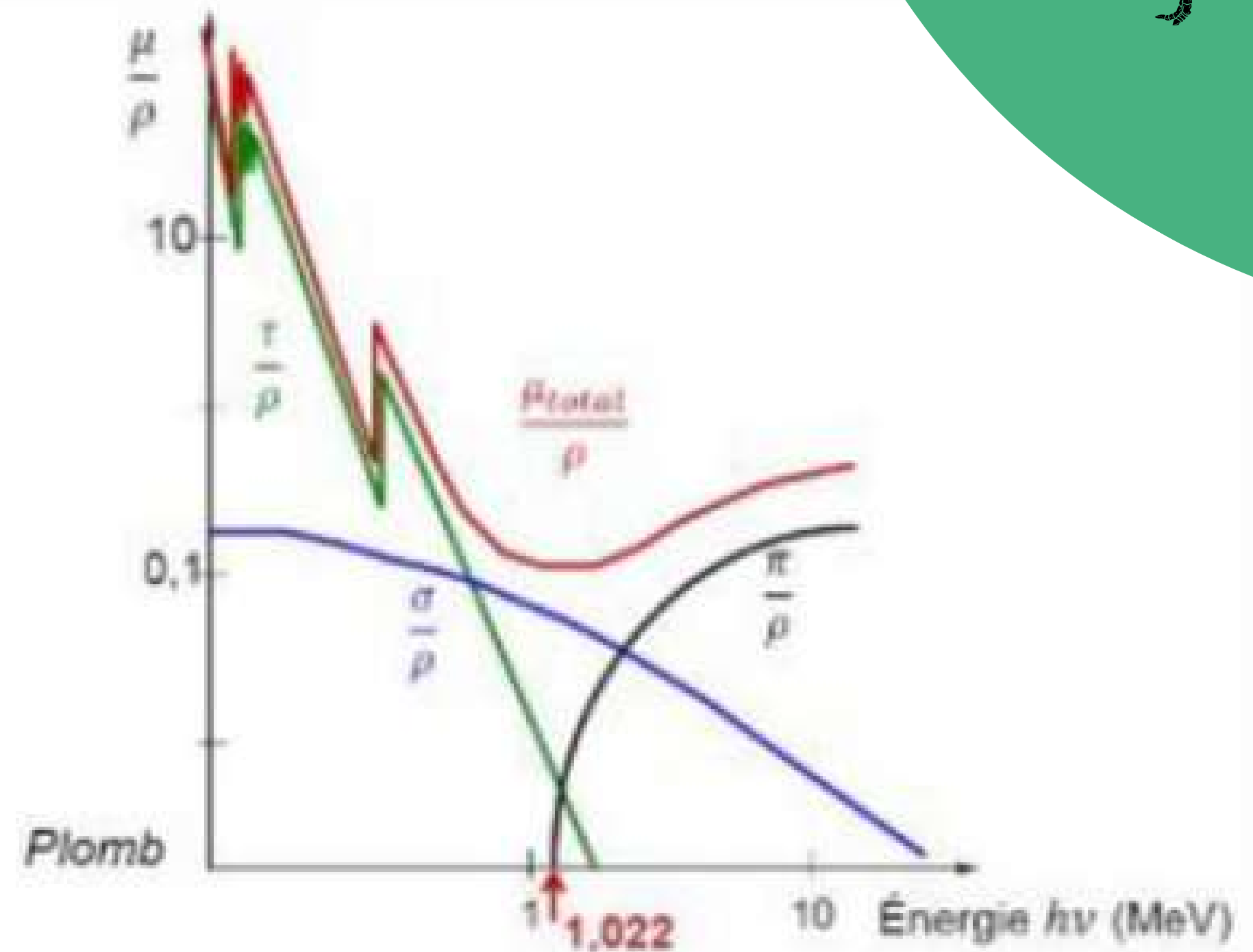
- Photon TRES énergétique à proximité du noyau
- Energie \rightarrow 2 particules (e^- et β^+)
- Uniquement si $h\nu \geq 1022 \text{ keV}$



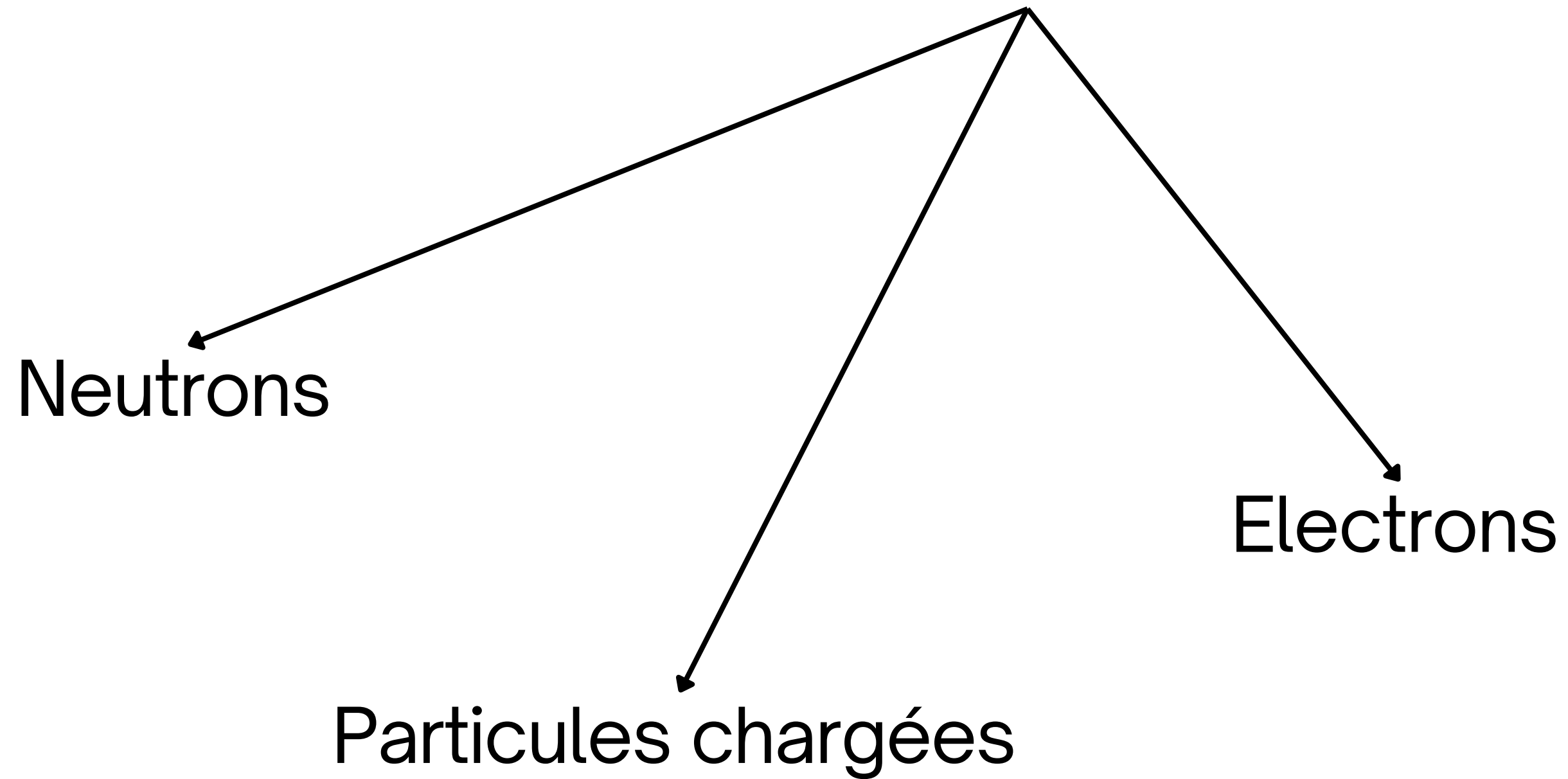
PROBABILITE DES INTERACTIONS



- Effet photo-électrique
Eléments lourds et photon faible E
- Effet Compton
Indépendant de la nature de la matière
photon faible E
- Création de paire
Photon de 1022keV minimum



INTERACTIONS DES PARTICULES AVEC LA MATIERE



INTERACTIONS DES NEUTRONS AVEC LA MATIERE

- Non chargés, indirectement ionisants → chocs directs
- Très pénétrants car probabilité d'interaction faible

Neutrons rapides

- Milieux riches en H : percussion du noyau
- Milieux riches en noyaux lourds : neutrons rebondissent

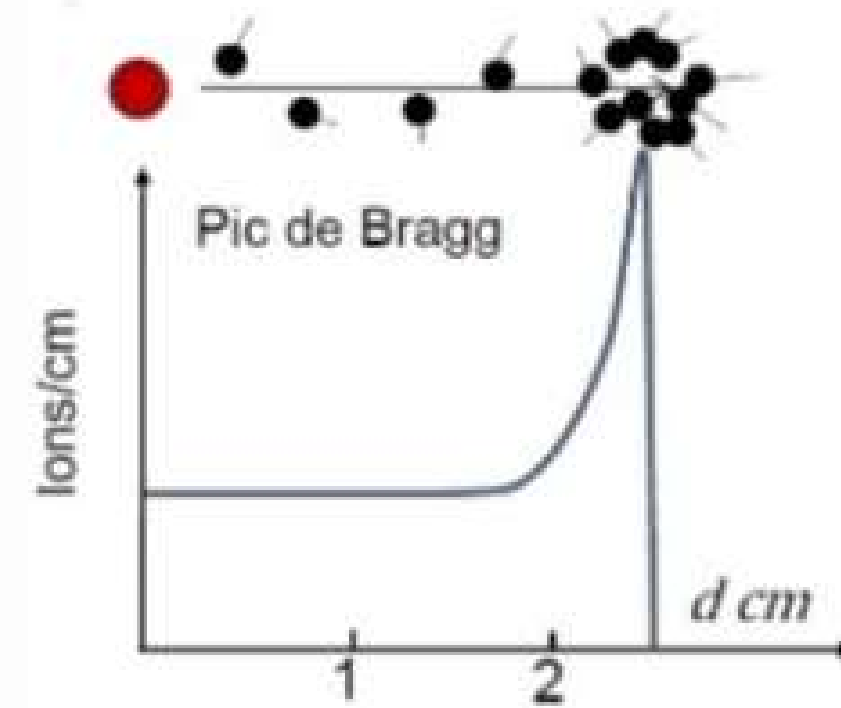
Neutrons lents

- Absorbés par les noyaux (capture nucléaire)

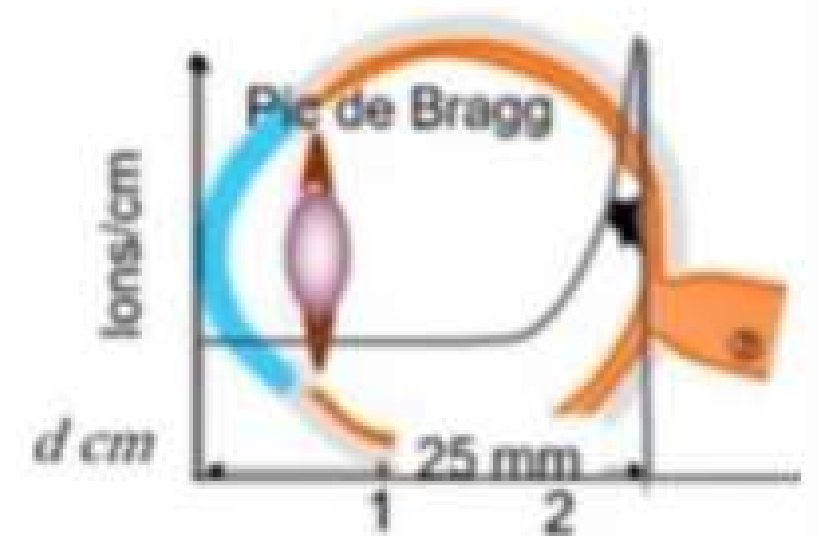
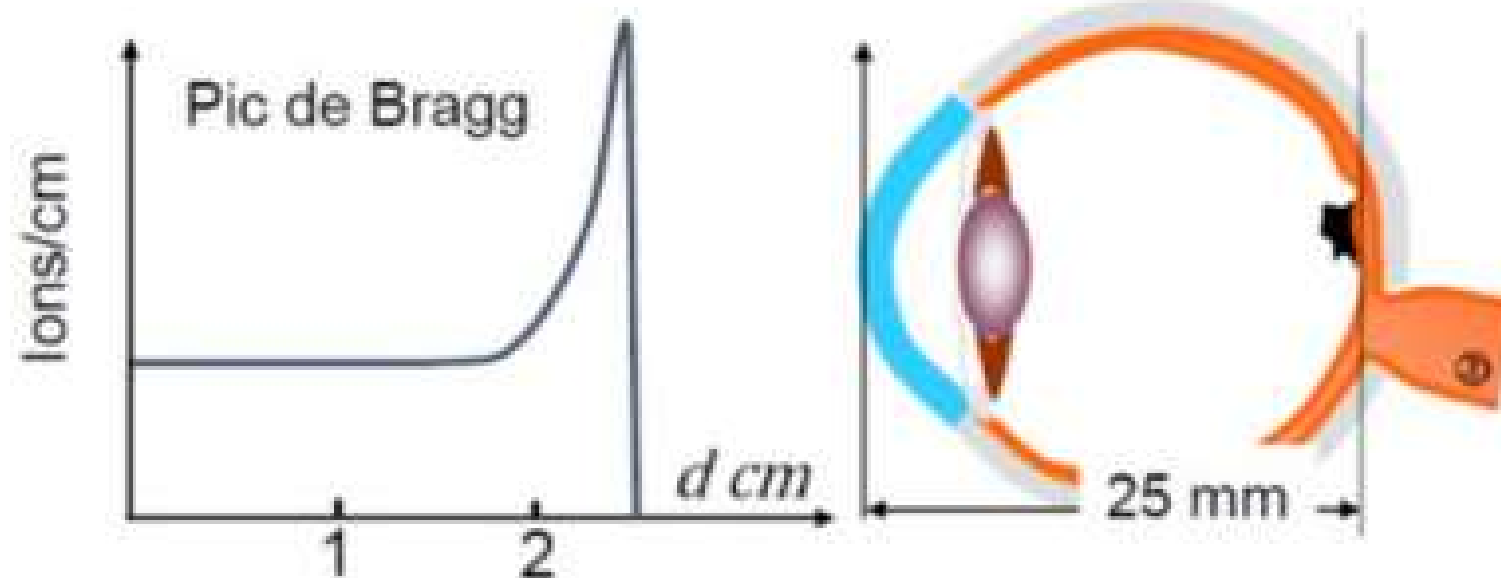
INTERACTIONS DES PARTICULES CHARGÉES

Particules alpha et protons

- Interactions coulombiennes (à distance)
- Trajectoire rectiligne (car masse élevée)
- Parcours relativement court : le pic de Braag

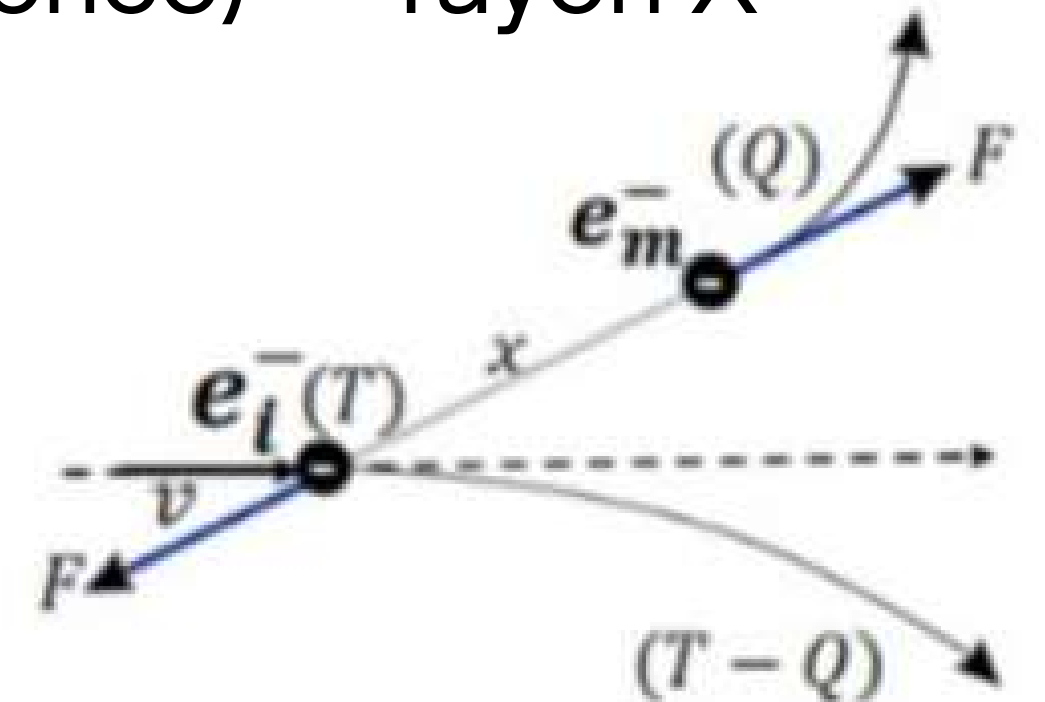


Exemple de la *protonthérapie* : traitement des tumeurs avec précision



INTERACTIONS DES ELECTRONS

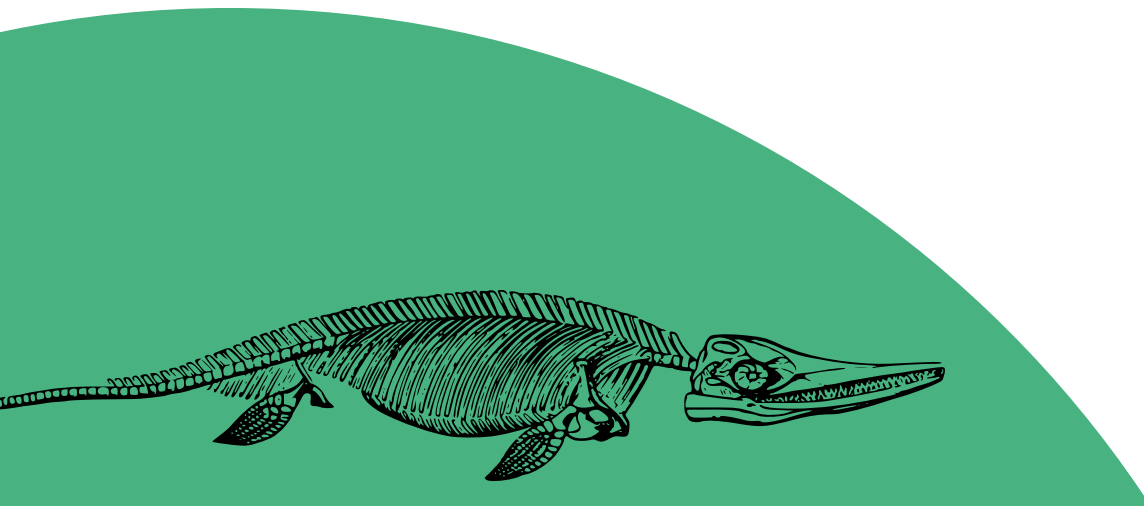
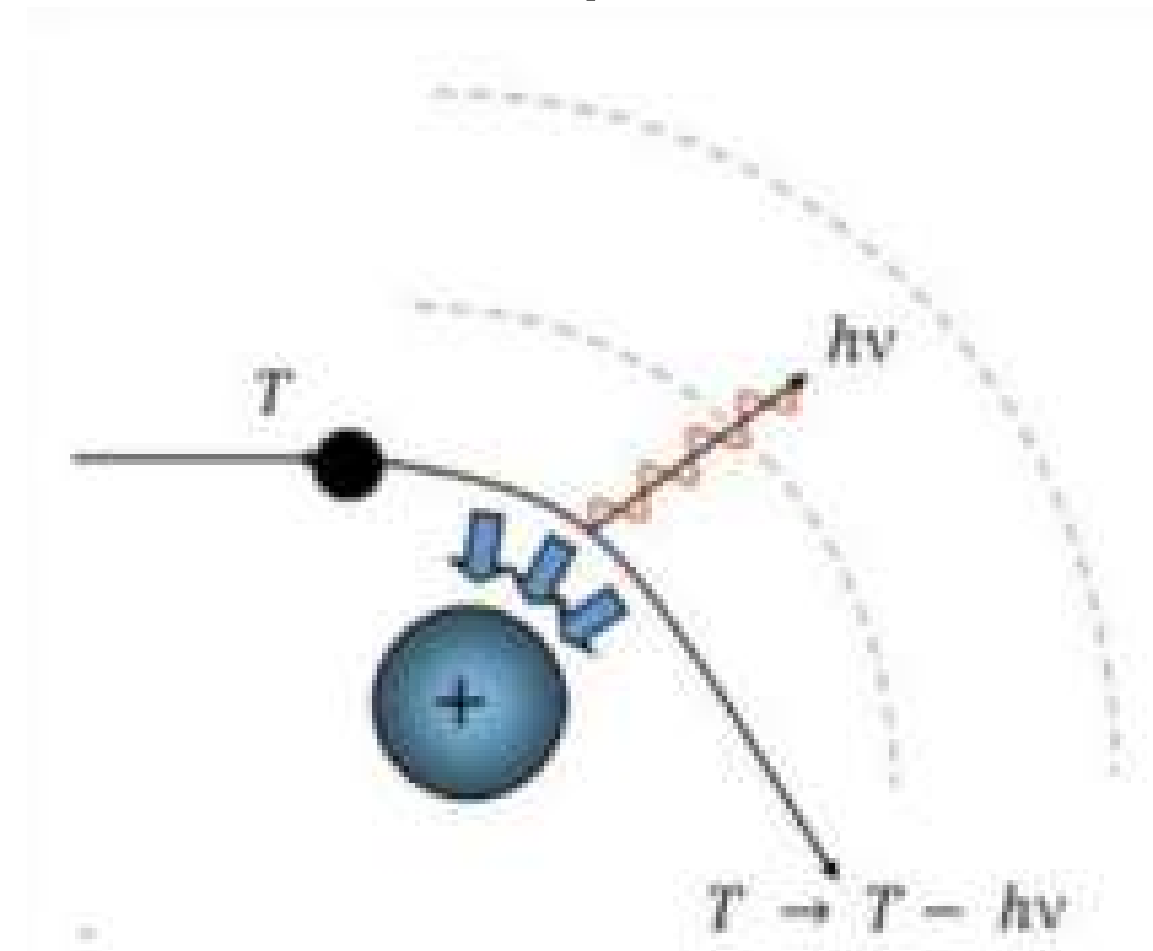
- Interaction “par collision” : électron-électron
- Pas d’interactions (chocs) physiques mais des interactions coulombiennes par deux charges qui vont se repousser
 - Si $T < |Wi|$ → pas de déplacement mais chaleur et vibration
 - Si $T = |Wi|$ → excitation
 - Si $T \geq |Wi|$ → ionisation
- Etat instable : réarrangement (photons de fluorescence) → rayon X



INTERACTIONS DES ELECTRONS

→ Interaction “par freinage” : électron-noyau

- Attraction coulombienne du noyau
- Différence de masse importante
- Electron dévié par accélération centripète → création d'une photon (RX)
- Perte d'E de l'électron



INSTANT QCM

QCM : A propos des rayonnements ionisants, indiquez la (les) proposition(s) exacte(s) :

- A) La radioactivité provient du nuage électronique
- B) L'énergie de l'électron se note W_i et son énergie de liaison se note $|W_i|$
- C) On observe une ionisation si $E < |W_i| - |W_j|$
- D) L'énergie de l'ionisation est quantifiée (valeurs bien définies)
- E) Les propositions A, B, C et D sont fausses

INSTANT QCM

QCM : A propos des rayonnements ionisants, indiquez la (les) proposition(s) exacte(s) :

- A) La radioactivité provient du nuage électronique
- B) L'énergie de l'électron se note W_i et son énergie de liaison se note $|W_i|$
- C) On observe une ionisation si $E < |W_i| - |W_j|$
- D) L'énergie de l'ionisation est quantifiée (valeurs bien définies)
- E) Les propositions A, B, C et D sont fausses

INSTANT QCM

QCM : A propos des rayonnements ionisants, indiquez la (les) proposition(s) exacte(s) :

- A) L'énergie minimale pour qu'un rayonnement soit ionisant est de 13,6 keV
- B) Les UV sont des RI
- C) Les particules chargées (γ ; X ; n) sont directement ionisantes ; elles ont des interactions obligatoires
- D) Plus une particule est chargée, plus elle pénétrera dans la matière
- E) Les propositions A, B, C et D sont fausses

INSTANT QCM

QCM : A propos des rayonnements ionisants, indiquez la (les) proposition(s) exacte(s) :

- A) L'énergie minimale pour qu'un rayonnement soit ionisant est de 13,6 keV
- B) Les UV sont des RI
- C) Les particules chargées (γ ; X ; n) sont directement ionisantes ; elles ont des interactions obligatoires
- D) Plus une particule est chargée, plus elle pénétrera dans la matière
- E) Les propositions A, B, C et D sont fausses

INSTANT QCM

QCM : A propos des rayonnements ionisants, indiquez la (les) proposition(s) exacte(s) :

- A) Les photons peuvent être absorbés, diffusés ou transmis
- B) La CDA c'est l'épaisseur x qui diminue le flux de photon incident d'un facteur 2
- C) L'effet Compton correspond à un transfert de la totalité de l'énergie du photon
- D) La création de paire concerne des photons très énergétiques ($\geq 1,022$ MeV)
- E) Les propositions A, B, C et D sont fausses

INSTANT QCM

QCM : A propos des rayonnements ionisants, indiquez la (les) proposition(s) exacte(s) :

- A) Les photons peuvent être absorbés, diffusés ou transmis
- B) La CDA c'est l'épaisseur x qui diminue le flux de photon incident d'un facteur 2
- C) L'effet Compton correspond à un transfert de la totalité de l'énergie du photon
- D) La création de paire concerne des photons très énergétiques ($\geq 1,022$ MeV)
- E) Les propositions A, B, C et D sont fausses

Conclusion

- Cours un peu compliqué les premières fois
- Important car beaucoup d'utilisation en santé
- QCM largement accessibles vous verrez !



INSTANT QUESTIONS

C'est le moment si vous en avez !!

→ Levez la main ou utilisez le socrative

