Équations Sect 8.1, #1 à 8 Sect 8.2, #9 à 16 Sect 8.3, #17 à 25

CH 8 LA DUALITÉ ONDE-PARTICULE

CONSTANTES UTILES

$c = 2{,}998 \times 10^{8}\ \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$

$h = 6{,}626 \times 10^{-34}\ \mathrm{J \cdot s}$

$hc \approx 1\,240\ \mathrm{eV \cdot nm}$

$\sigma = 5{,}67 \times 10^{-8}\ \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m^2 K^4}}$

$m_e = 9{,}109 \times 10^{-31}\ \mathrm{kg}$

$1\ \mathrm{eV} = 1{,}602 \times 10^{-19}\ \mathrm{J}$

$e = 1{,}602 \times 10^{-19}\ \mathrm{C}$

$T_K = T_C + 273{,}15\ °\mathrm{C}$

Élément	ϕ (eV)
Césium	2,14
Cuivre	4,70
Fer	4,70
Magnésium	3,66
Potassium	2,29
Sodium	2,36
Titane	4,33

ÉQUATIONS LIÉES AU CHAPITRE :

$\boxed{E = hf}$ $\boxed{K = \frac{1}{2}mv^2}$

$\boxed{\frac{hc}{\lambda} = \phi + eV_{arrêt}}$

$\boxed{I = \sigma T^4}$ $\boxed{\lambda_{max} T = 2{,}898 \times 10^{-3}\ \mathrm{m \cdot K}}$

$\boxed{K_{max} = e \cdot V_{arrêt}}$ $\boxed{hf - \phi = K_{max}}$

$\boxed{E_{faisc} = Nhf}$ $\boxed{I = \sigma(T^4 - T_0^4)}$

8.1 LES PHOTONS

8.1 Exercice : L'énergie d'un photon solution ▶

Quelle est l'énergie d'un photon dont la fréquence correspond à :

a) $4{,}74\times10^{14}$ Hz, un photon de lumière rouge;
b) 10^{10} Hz, un photon micro-ondes;
c) 10^{24} Hz, un photon de rayon gamma.

8.2 Exercice : Photon vert solution ▶

Exprimez en électronvolts l'énergie d'un photon de lumière verte dont la longueur d'onde vaut 550 nm.

8.3 Exercice : 1 eV solution ▶

Quelle serait la longueur d'onde d'un photon de 1 eV?

8.4 Exercice : Rouge sur violet solution ▶

Quel est le rapport de l'énergie d'un photon à l'extrémité rouge du spectre visible par rapport à celle d'un photon à l'extrémité violette?

8.5 Exercice : iPhone et UVB solution ▶

Les réseaux cellulaires utilisent entre autres la fréquence de 2 100 MHz pour les télécommunications. Par ailleurs, les rayons ultraviolets de la catégorie UVB contiennent entre autres les photons d'une longueur d'onde de 300 nm. Combien de photons émis par les antennes cellulaires faut-il pour porter la même énergie qu'un seul photon ultraviolet UVB?

8.6 Exercice : Énergie lumineuse solution ▶

Quelle est, en joules, l'énergie produite par une source émettant 10^{20} photons d'une longueur d'onde de 632 nm?

8.7 Exercice : Rayon laser solution ▶

Le fusil laser de Luke Skywalker émet une impulsion à une puissance de 200 watts durant cinq centièmes de seconde.

a) Quelle énergie est émise lors de chaque impulsion?
b) Combien de photons sont émis lors d'une impulsion si leur longueur d'onde est de 610 nm?

8.8 Exercice : Télé à photons solution ▶

Votre télévision utilise environ 2,50 W pour émettre de la lumière pour la production de l'image. Si la longueur d'onde moyenne de la lumière produite est de 550 nm, combien de photons sont produits chaque seconde par l'écran?

8.2 LE RAYONNEMENT DU CORPS NOIR

8.9 Exercice : Irradiance émise solution ▶

Quelle est l'irradiance émise par un corps dont la température de surface est de :

a) 280 K
b) 37,0 °C
c) 100 °C
d) 2000 °C

8.10 Exercice : Deux fois plus chaud solution ▶

En degrés Celsius, quelle température doit avoir un corps pour émettre deux fois plus d'énergie par unité de surface qu'un corps à une température de 20 °C?

8.11 Exercice : Le poêle à bois solution ▶

Un poêle à bois émet 9 500 watts dans un chalet, par l'ensemble de sa surface de 4,25 m². À quelle température est la surface de ce poêle?

8.12 Exercice : Environnement chauffant solution ▶

Quelle est l'irradiance nette d'un corps à 30,0 °C dans un environnement à :

a) 0 °C;
b) 20 °C;
c) 30 °C;
d) 40 °C.

8.13 Exercice : Chauffage sur mesure solution ▶

Lors de la conception d'un système de chauffage, on détermine qu'il doit produire 1 000 watts nets en réchauffement. L'élément chauffant présente une surface de 900 cm² face à un environnement à environ 15,0 °C.

a) À quelle température, en degrés Celsius, doit-on porter l'élément chauffant pour atteindre la puissance nette émise de 1 000 W?
b) À cette température, à quelle longueur d'onde se trouve le pic d'émission de la courbe de radiance spectrale?

8.1- a) $E = 3{,}14\times10^{-19}$ J — b) $E = 6{,}63\times10^{-24}$ J — c) $E = 6{,}63\times10^{-10}$ J — **8.2**- $E = 2{,}25$ eV — **8.3**- $\lambda = 1240$ nm — **8.4**- $E_R/E_V = 0{,}571$ — **8.5**- $N = 4{,}76\times10^{5}$
8.6- $E = 31{,}4$ J — **8.7**- a) $E = 10{,}0$ J — b) $N = 3{,}07\times10^{19}$ — **8.8**- $N = 6{,}92\times10^{18}$ — **8.9**- a) $I = 349$ W/m² — b) $I = 524$ W/m² — c) $I = 1098$ W/m² — d) $I = 1{,}51\times10^{6}$ W/m²
8.10- $T = 75{,}4$ °C — **8.11**- $T = 173$ °C — **8.12**- a) $I = 163$ W/m² — b) $I = 60{,}0$ W/m² — c) $I = 0$ W/m² — d) $I = -66{,}3$ W/m² — **8.13**- a) $T = 398$ °C — b) $\lambda = 4318$ nm

8.14 Exercice : Pic infrarouge solution ▶

On cherche à produire une source lumineuse dont la longueur d'onde à laquelle le plus d'énergie est émise se situe dans l'infrarouge à 2 700 nm. À quelle température doit-on porter la surface de cette source?

8.15 Exercice : L'irradiance volcanique solution ▶

En analysant la courbe de radiance spectrale de la surface de la lave dans le cratère d'un volcan, on observe que le pic d'émission se trouve à 1 640 nm. Quelle est la puissance émise par un mètre carré de la surface du réservoir de lave?

8.16 Exercice : Rayon de Soleil solution ▶

Le Soleil a un rayon de $6,96\times10^{8}$ m, sa surface est à la température de 5 800 K et il se trouve à 149 millions de kilomètres de la Terre.

a) Quelle est l'irradiance de la surface du Soleil?
b) Quelle est la puissance totale émise par le Soleil?
c) En négligeant l'effet de l'atmosphère, quelles est l'irradiance reçue par un mètre carré sur Terre, exposé perpendiculairement aux rayons du Soleil?

8.3 L'EFFET PHOTOÉLECTRIQUE

8.17 Question : Énergie d'extraction solution ▶

Un électron dans un atome de fer absorbe un photon ayant une énergie tout juste égale au travail d'extraction. Quelle sera l'énergie cinétique du photoélectron produit?

8.18 Exercice : Vitesse du photoélectron solution ▶

Un photoélectron est éjecté de son atome avec une énergie cinétique de 0,927 eV. Quelle est sa vitesse?

8.19 Exercice : Magnésium solution ▶

Un photon de $1,14\times10^{15}$ Hz atteint un atome de magnésium et un photoélectron est émis.

a) Quelle est l'énergie du photon, en électronvolts?
b) Quelle est l'énergie cinétique du photoélectron, en électronvolt?
c) Quelle est la vitesse d'éjection du photoélectron?

8.20 Question : Effet sur l'effet photoélectrique solution ▶

Quel effet les modifications suivantes ont-elles sur le potentiel d'arrêt lors d'une expérience sur l'effet photoélectrique :

a) On réduit la fréquence du rayonnement incident;
b) Le matériau bombardé est remplacé par un autre dont le travail d'extraction est supérieur;
c) On augmente l'irradiance de la source de photons.
d) On éloigne les deux électrodes du montage une de l'autre.

8.21 Exercice : Cuivre solution ▶

À partir de quelle longueur d'onde un rayonnement est-il en mesure de déclencher l'effet photoélectrique du cuivre?

8.22 Exercice : Potassium solution ▶

Quel est le potentiel d'arrêt pour l'effet photoélectrique du potassium pour ces différentes longueur d'onde de photon incident?

a) 340 nm
b) 450 nm
c) 560 nm

8.23 Exercice : Élément non identifié solution ▶

On parvient à déclencher l'effet photoélectrique sur un matériau inconnu en utilisant des photons ultraviolets de 367 nm, et le potentiel d'arrêt constaté est 1,02 V.

a) Quel est le travail d'extraction des atomes du matériau inconnu?
b) De quel élément s'agit-il, selon cette valeur?

8.24 Exercice : La photodiode solution ▶

Des photoélectrons sont éjectés à une vitesse de $6,90\times10^{5}$ m/s de la surface d'une composante électronique en développement faite à partir de césium. Quelle est la longueur d'onde des photons ayant déclenché la réaction?

8.25 Exercice : Deux scénarios solution ▶

On mesure lors d'un effet photo électrique un potentiel d'arrêt de 0,332 V. En utilisant un rayonnement dont la fréquence est 50,0 % plus grande, le potentiel d'arrêt est plutôt de 2,55 V.

a) Quel est le travail d'extraction du matériau utilisé?
b) Quelle est la longueur d'onde la plus faible des deux rayonnements utilisés?

8.14- T = 1073 K — **8.15**- $P = 5,53\times10^{5}$ W — **8.16**- a) $I = 6,42\times10^{7}$ W/m² — b) $P = 3,91\times10^{26}$ W — c) I = 1400 W/m² — **8.17**- K = 0 J — **8.18**- $v = 5,71\times10^{5}$ m/s — **8.19**- a) E = 4,72 eV — b) K = 1,06 eV — c) $v = 6,09\times10^{5}$ m/s — **8.20**- a) $V_{arrêt}$ diminue — b) $V_{arrêt}$ diminue — c) $V_{arrêt}$ ne varie pas — d) $V_{arrêt}$ ne varie pas — **8.21**- λ_{seuil} = 264 nm — **8.22**- a) $V_{arrêt}$ = 1,36 V — b) $V_{arrêt}$ = 0,466 V — c) $V_{arrêt} = \varnothing$ — **8.23**- a) ϕ = 2,36 eV — b) Sodium — **8.24**- λ = 355 nm — **8.25**- a) ϕ = 4,10 eV — b) λ = 186 nm

Équations Sect 8.1, #1 à 8 Sect 8.2, #9 à 16 Sect 8.3, #17 à 25

CH 8 LA DUALITÉ ONDE-PARTICULE

8.1 LA NOTION DE PHOTON

8.1 Solution : L'énergie d'un photon retour à la question ▲

a) E = 3,14×10^{-19} J

L'énergie d'un photon, à partir de la fréquence, est donnée par :

$$E = hf \tag{1}$$

$$E = (6{,}626 \times 10^{-34}\ \mathrm{J \cdot s}) \times (4{,}74 \times 10^{14}\ \mathrm{Hz}) \quad = \quad \mathbf{3{,}14 \times 10^{-19}\ J}$$

b) E = 6,63×10^{-24} J

À partir de la même équation (1) :

$$E = hf \quad = \quad (6{,}626 \times 10^{-34}\ \mathrm{J \cdot s}) \times (10^{10}\ \mathrm{Hz}) \quad = \quad \mathbf{6{,}63 \times 10^{-24}\ J}$$

c) E = 6,63×10^{-10} J

À partir de la même équation (1) :

$$E = hf \quad = \quad (6{,}626 \times 10^{-34}\ \mathrm{J \cdot s}) \times (10^{24}\ \mathrm{Hz}) \quad = \quad \mathbf{6{,}63 \times 10^{-10}\ J}$$

retour à la question ▲

8.2 Solution : Photon vert retour à la question ▲

E = 2,25 eV

L'énergie d'un photon, à partir de la longueur d'onde, est donnée par :

$$E = hf = \frac{hc}{\lambda}$$

En utilisant la valeur condensée du produit hc, qui donnera directement une énergie en électronvolts, on trouve :

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad = \quad \frac{1\,240\ \mathrm{eV{\cdot}nm}}{550\ \mathrm{nm}} \quad = \quad \mathbf{2{,}25\ eV}$$

*Si on avait fait le calcul détaillé avec la constante de Planck et la conversion des joules en électronvolts :

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad = \quad \frac{(6{,}626\times10^{-34}\ \mathrm{J{\cdot}s})\times(2{,}998\times10^{8}\ \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}})}{550\ \mathrm{nm}} \quad = \quad 3{,}61 \times 10^{-19}\ \mathrm{J}$$

$E = (3{,}61 \times 10^{-19}\ \mathrm{J}) \times \frac{1\ \mathrm{eV}}{1{,}602\times10^{-19}\ \mathrm{J}} \quad = \quad \mathbf{2{,}26\ eV}$ … une légère différence…

retour à la question ▲

8.3 Solution : 1 eV retour à la question ▲

λ = 1240 nm

À partir de l'équation de l'énergie d'un photon, on peut isoler la longueur d'onde :

$$E = hf = \frac{hc}{\lambda} \quad \Rightarrow \quad \lambda = \frac{hc}{E} \quad = \quad \frac{1\,240\ \mathrm{eV{\cdot}nm}}{1\ \mathrm{eV}} \quad = \quad \mathbf{1\,240\ nm}$$

retour à la question ▲

8.4 Solution : Rouge sur violet retour à la question ▲

E_r/E_v = 0,571

Les extrémités du spectre visible considérées dans le cours sont 400 nm à 700 nm. L'énergie d'un photon, en fonction de la longueur d'onde, est :

$$E = \frac{hc}{\lambda}$$

On peut établir algébriquement le rapport des énergies des deux photons :

$$\frac{E_r}{E_v} = \frac{\left(\frac{hc}{\lambda_r}\right)}{\left(\frac{hc}{\lambda_v}\right)} = \frac{\lambda_v}{\lambda_r} = \frac{400\ \text{nm}}{700\ \text{nm}} = \mathbf{0,571}$$

retour à la question ▲

8.5 Solution : iPhone et UVB retour à la question ▲

N = 4,76×10^5

La question laisse entendre que l'énergie d'un photon micro-ondes est inférieure à l'énergie d'un photon ultraviolet UVB. En effet, la fréquence de la bande ultraviolette est supérieure. Une longueur d'onde de 300 nm correspond à une fréquence déterminée par :

$$f_{UVB} = \frac{c}{\lambda} = \frac{2{,}998\times10^{8}\ \frac{\text{m}}{\text{s}}}{300\times10^{-9}\ \text{m}} = 9{,}99 \times 10^{16}\ \text{Hz}$$

On constate que cette fréquence est supérieure à celle des micro-ondes décrites dans l'énoncé, de 2 100 MHz, c'est-à-dire 2,10×10^9 Hz. On peut donc affirmer que $E_{UVB} > E_{MO}$, et la quantité N de photons micro-ondes portant la même énergie qu'un seul photon UVB peut être définie par :

$$E_{UVB} = NE_{MO}$$

$$N = \frac{E_{UVB}}{E_{MO}} = \frac{\left(\frac{hc}{\lambda_{UVB}}\right)}{hf_{MO}} = \frac{c}{\lambda_{UVB}\cdot f_{MO}} = \frac{2{,}998\times10^{8}\ \frac{\text{m}}{\text{s}}}{(300\times10^{-9}\ \text{m})\times(2{,}10\times10^{9}\ \text{Hz})} = \mathbf{4,76\times10^{5}}$$

retour à la question ▲

8.6 Solution : Énergie lumineuse retour à la question ▲

E = 31,4 J

L'énergie totale émise par une source de N photons est :

$$E = Nhf = N\frac{hc}{\lambda} = 10^{20} \times \frac{(6{,}626\times10^{-34}\ \text{J}\cdot\text{s})\times(2{,}998\times10^{8}\ \frac{\text{m}}{\text{s}})}{632\times10^{-9}\ \text{m}} = \mathbf{31,4\ J}$$

retour à la question ▲

8.7 Solution : Rayon laser retour à la question ▲

a) E = 10,0 J

La puissance indiquée est liée à l'énergie d'une impulsion via la durée de cette impulsion, par :

$$P = \frac{E}{\Delta t} \quad \Rightarrow \quad E = P\cdot\Delta t = 200\ \text{W} \times 0{,}05\ \text{s} = \mathbf{10,0\ J}$$

b) N = 3,07×10^{19}

L'énergie contenue dans un faisceau de photons, en fonction de leur fréquence, est :

$$E_{imp} = Nhf = N\frac{hc}{\lambda}$$

On isole la quantité N pour connaître le nombre de photons correspondant :

$$N = \frac{E_{imp}\lambda}{hc} = \frac{10{,}0\ J\times(610\times10^{-9}\ \text{m})}{(6{,}626\times10^{-34}\ \text{J}\cdot\text{s})\times(2{,}998\times10^{8}\ \frac{\text{m}}{\text{s}})} = \mathbf{3,07\times10^{19}}$$

retour à la question ▲

8.8 Solution : Télé à photons retour à la question ▲

N = 6,92×10^18

La puissance indiquée de 2,50 W correspond à une énergie émise de 2,50 J chaque seconde. On peut donc travailler avec cette quantité d'énergie, plutôt qu'une puissance, pour réponde à la question.

Le nombre de photons correspondant à une certaine quantité d'énergie est donnée par :

$$E = Nhf = N\frac{hc}{\lambda}$$

On isole la quantité N pour connaître le nombre de photons correspondant :

$$N = \frac{E\lambda}{hc} = \frac{2{,}50\ \mathrm{J}\times(550\times10^{-9}\ \mathrm{m})}{(6{,}626\times10^{-34}\ \mathrm{J{\cdot}s})\times(2{,}998\times10^{8}\ \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}})} = \mathbf{6{,}92\times10^{18}}$$

retour à la question ▲

8.2 LE RAYONNEMENT DU CORPS NOIR

8.9 Solution : Irradiance émise retour à la question ▲

a) I = 349 W/m²

L'irradiance émise par une surface, en fonction de la température en kelvins, est donnée par :

$$I = \sigma T^4 \tag{1}$$

Pour une température de 280 K :

$$I = \sigma T^4 = \left(5{,}67\times10^{-8}\ \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m^2K^4}}\right)\times(280\ \mathrm{K})^4 = \mathbf{349\ \frac{W}{m^2}}$$

b) I = 524 W/m²

On utilise l'équation (1) présentée en a), et on fait la conversion de la température de 37,0 °C en kelvins à même le calcul :

$$I = \sigma T^4 = \left(5{,}67\times10^{-8}\ \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m^2K^4}}\right)\times\left((37{,}0+273)\ \mathrm{K}\right)^4 = \mathbf{524\ \frac{W}{m^2}}$$

c) I = 1098 W/m²

On utilise l'équation (1) présentée en a), et on fait la conversion de la température de 100 °C en kelvins à même le calcul :

$$I = \sigma T^4 = \left(5{,}67\times10^{-8}\ \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m^2K^4}}\right)\times\left((100+273)\ \mathrm{K}\right)^4 = \mathbf{1\,098\ \frac{W}{m^2}}$$

d) I = 1,51×10^6 W/m²

On utilise l'équation (1) présentée en a), et on fait la conversion de la température de 2 000 °C en kelvins à même le calcul :

$$I = \sigma T^4 = \left(5{,}67\times10^{-8}\ \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m^2K^4}}\right)\times\left((2\,000+273)\ \mathrm{K}\right)^4 = \mathbf{1{,}51\times10^{6}\ \frac{W}{m^2}}$$

retour à la question ▲

8.10 Solution : Deux fois plus chaud retour à la question ▲

T = 75,4 °C

On cherche une température T' pour laquelle l'irradiance est le double de l'irradiance à 20 °C, c'est-à-dire :

$$I_{T'} = 2I_{20}$$

Puisque l'irradiance est donnée par $I = \sigma T^4$, la relation devient :

$$\sigma T_{T'}^4 = 2(\sigma T_{20}^4)$$

$$T_{T'}^4 = 2T_{20}^4$$

$$T_{T'} = \sqrt[4]{2}\cdot T_{20} = \sqrt[4]{2}\times(273+20)\ \mathrm{K} = 348\ \mathrm{K}$$

Convertie en degrés Celsius, cette température est :

$$T_{T'} = (348-273)\ {}^\circ\mathrm{C} = \mathbf{75{,}4\ {}^\circ C}$$

retour à la question ▲

retour à la question ▲

8.11 Solution : Le poêle à bois

retour à la question ▲

T = 173 °C

On doit d'abord déterminer l'irradiance à partir de la puissance émise et de la surface émettrice :

$$I = \frac{P}{A} = \frac{9\,500\ \text{W}}{4{,}25\ \text{m}^2} = 2\,235\ \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

À partir de cette irradiance, on peut calculer la température de la surface du poêle :

$$I = \sigma T^4 \quad \rightarrow \quad T = \sqrt[4]{\frac{I}{\sigma}} = \sqrt[4]{\frac{2\,235\ \frac{\text{W}}{\text{m}^2}}{5{,}67\times10^{-8}\ \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}^4}}} = 446\ \text{K}$$

Convertie en degrés Celsius, cette température est :

$$T = (446 - 273)\ °\text{C} = \mathbf{173\ °C}$$

retour à la question ▲

8.12 Solution : Environnement chauffant

retour à la question ▲

a) I = 163 W/m²

L'irradiance nette est donnée par :

$$I_{net} = \sigma(T^4 - T_0^4) \tag{1}$$

Pour un corps à une température de 30 °C = 303 K et dans un environnement à 0 °C = 273 K :

$$I_{net} = \left(5{,}67 \times 10^{-8}\ \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}^4}\right) \times \left((303\ K)^4 - (273\ K)^4\right) = \mathbf{163\ \frac{W}{m^2}}$$

b) I = 60,0 W/m²

Avec la même équation (1), pour un corps à une température de 30 °C = 303 K et dans un environnement à 20 °C = 293 K :

$$I_{net} = \left(5{,}67 \times 10^{-8}\ \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}^4}\right) \times \left((303\ K)^4 - (293\ K)^4\right) = \mathbf{60{,}0\ \frac{W}{m^2}}$$

c) I = 0 W/m²

Avec la même équation (1), pour un corps à une température de 30 °C = 303 K et dans un environnement à 30 °C = 303 K :

$$I_{net} = \left(5{,}67 \times 10^{-8}\ \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}^4}\right) \times \left((303\ K)^4 - (303\ K)^4\right) = \mathbf{0\ \frac{W}{m^2}}$$

Lorsqu'il est à la même température que son environnement, il est en équilibre thermique. Il reçoit autant d'énergie qu'il en émet et son irradiance nette est nulle.

d) I = –66,3 W/m²

Avec la même équation (1), pour un corps à une température de 30 °C = 303 K et dans un environnement à 40 °C = 313 K :

$$I_{net} = \left(5{,}67 \times 10^{-8}\ \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}^4}\right) \times \left((303\ K)^4 - (313\ K)^4\right) = \mathbf{-66{,}3\ \frac{W}{m^2}}$$

Une irradiance nette négative signifie qu'un corps reçoit plus d'énergie qu'il en émet. Il se réchauffe donc sous l'effet de son environnement plus chaud.

retour à la question ▲

retour à la question ▲

retour à la question ▲

8.13 Solution : Chauffage sur mesure

retour à la question ▲

a) T = 398 °C

Pour que le système émette 1000 W à partir d'une surface de 900 cm², il doit avoir une irradiance nette définie par :

$$I = \frac{P}{A} = \frac{1\,000\text{ W}}{900\text{ cm}^2 \times \left(\frac{1\text{ m}}{100\text{ cm}}\right)^2} = 1,\overline{11} \times 10^4\ \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

Cette irradiance nette est définie par la température de l'environnement (20 °C = 288 K) et par la température recherchée de la surface chauffante, dans l'équation suivante :

$$I_{net} = \sigma(T^4 - T_0^4)$$

$$T = \sqrt[4]{T_0^4 + \frac{I_{net}}{\sigma}} = \sqrt[4]{(288\ K)^4 + \frac{1{,}\overline{11}\times 10^4\ \frac{\text{W}}{\text{m}^2}}{5{,}67\times 10^{-8}\ \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}^4}}} = 671\text{ K}$$

Convertie en degrés Celsius, cette température est :

$$T = (671 - 273)\text{ °C} = \mathbf{398\ °C}$$

b) λ_{max} = 4318 nm

La loi du déplacement de Wien permet de lier la température de la surface à la longueur d'onde du pic d'émission :

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

$$\lambda_{max} = \frac{2{,}898\times 10^{-3}\text{ m}\cdot\text{K}}{T} = \frac{2{,}898\times 10^{-3}\text{ m}\cdot\text{K}}{671\text{ K}} = \mathbf{4\,318\ nm}$$

retour à la question ▲

8.14 Solution : Pic infrarouge

retour à la question ▲

T = 1073 K

La loi du déplacement de Wien permet de lier la température recherchée à la longueur d'onde qui doit être produite par la source lumineuse :

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

$$T = \frac{2{,}898\times 10^{-3}\text{ m}\cdot\text{K}}{\lambda_{max}} = \frac{2{,}898\times 10^{-3}\text{ m}\cdot\text{K}}{2\,700\times 10^{-9}\text{ m}} = \mathbf{1\,073\ K}$$

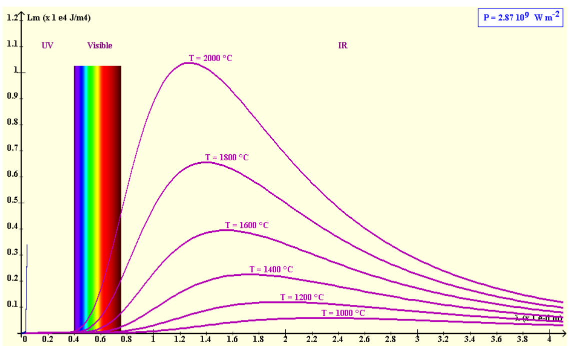
retour à la question ▲

8.15 Solution : L'irradiance volcanique

retour à la question ▲

I = 5,53×10⁵ W/m²

Pour déterminer l'irradiance, définie par $I = \sigma T^4$, on doit connaître la température. Celle-ci, si la longueur d'onde du pic d'émission est connue, peut être déterminée par la loi du déplacement de Wien. La longueur d'onde à laquelle le plus d'énergie radiative est émise (pic d'émission) est fonction de la température (voir figure ci-contre). Ainsi, comme on nous indique la longueur d'onde du pic d'émission, on peut calculer la température du corps :



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

$$T = \frac{2{,}898\times 10^{-3}\text{ m}\cdot\text{K}}{\lambda_{max}} = \frac{2{,}898\times 10^{-3}\text{ m}\cdot\text{K}}{1\,640\times 10^{-9}\text{ m}} = \mathbf{1\,767\ K}$$

La température connue, on peut calculer l'irradiance émise, et ensuite la puissance émise :

$$I = \sigma T^4 = \left(5{,}67 \times 10^{-8}\ \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}^4}\right) \times (1\,767\ K)^4 = \mathbf{5,53 \times 10^5\ \frac{W}{m^2}}$$

retour à la question ▲

8.16 Solution : Rayon de Soleil retour à la question ▲

a) $I = 6{,}42\times10^{7}$ W/m²

L'irradiance de la surface du Soleil se calcule à partir simplement de la température de surface :

$$I = \sigma T^4 \quad = \quad \left(5{,}67\times10^{-8}\,\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m^2K^4}}\right)\times(5\,800\,K)^4 \quad = \quad \mathbf{6{,}42\times10^{7}\,\frac{W}{m^2}}$$

b) $P = 3{,}91\times10^{26}$ W

La puissance émise est liée à l'irradiance de chaque mètre carré de surface et à la superficie totale qui émet avec cette irradiance :

$$I = \frac{P}{A} \quad \Rightarrow \quad P = I\cdot A \quad = \quad \left(6{,}42\times10^{7}\,\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m^2}}\right)\times\left(4\pi\times(6{,}96\times10^{8}\ \mathrm{m})^2\right) \quad = \quad \mathbf{3{,}91\times10^{26}\ W}$$

c) $I = 1400$ W/m²

L'irradiance reçue sur Terre est donnée par la puissance émise par le Soleil divisée par l'aire sur laquelle cette puissance est étalée, à une distance du Soleil égale à la distance Terre-Soleil; car un mètre carré de surface sur Terre reçoit une fraction infime de la puissance du Soleil :

$$I = \frac{P_{Soleil}}{4\pi R_{TS}^2} \quad = \quad \frac{3{,}91\times10^{26}\ \mathrm{W}}{4\pi\times(1{,}49\times10^{11}\ \mathrm{m})^2} \quad = \quad 1{,}40\times10^{3}\,\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m^2}} \quad \approx \quad \mathbf{1\,400\,\frac{W}{m^2}}$$

(avec 3 chiffres significatifs)

retour à la question ▲

8.3 L'EFFET PHOTOÉLECTRIQUE

8.17 Solution : Énergie d'extraction retour à la question ▲

$K = 0$

L'énergie du photon absorbée par l'électron sert d'abord à extraire l'électron de l'atome, et l'excédent d'énergie sera l'énergie cinétique du photoélectron.

Si le photon a une énergie tout juste égale au travail d'extraction, l'électron sera arraché de son atome, mais il ne restera aucune énergie pour lui procurer en plus de l'énergie cinétique (vitesse). L'énergie cinétique du photoélectron ainsi créé sera donc nulle.

retour à la question ▲

8.18 Solution : Vitesse du photoélectron retour à la question ▲

$v = 5{,}71\times10^{5}$ m/s

L'énergie cinétique est définie par :

$$K = \tfrac{1}{2}mv^2$$

On peut isoler la vitesse v pour la calculer, mais on doit aussi convertir l'énergie indiquée en joules pour que la vitesse soit trouvée en m/s :

$$v = \sqrt{\frac{2K}{m}} \quad = \quad \sqrt{\frac{2\times0{,}927\ \mathrm{eV}\times\left(\frac{1{,}602\times10^{-19}\ \mathrm{J}}{1\ \mathrm{eV}}\right)}{9{,}109\times10^{-31}\ \mathrm{kg}}} \quad = \quad \mathbf{5{,}71\times10^{5}\,\frac{m}{s}}$$

retour à la question ▲

8.19 Solution : Magnésium retour à la question ▲

a) E = 4,72 eV

L'énergie du photon est donnée par :

$$E = hf \quad = \quad (6{,}626 \times 10^{-34}\ \mathrm{J \cdot s}) \times (1{,}14 \times 10^{15}\ \mathrm{Hz}) \quad = \quad 7{,}55 \times 10^{-19}\ \mathrm{J}$$

Convertie en électronvolts, cette énergie est :

$$E = (7{,}55 \times 10^{-19}\ \mathrm{J}) \times \left(\frac{1\ \mathrm{eV}}{1{,}602 \times 10^{-19}\ \mathrm{J}}\right) \quad = \quad \mathbf{4{,}72\ eV}$$

b) K = 1,06 eV

L'énergie du photon trouvée en a) sert en partie à fournir le travail d'extraction pour le magnésium (qui est de 3,66 eV). La balance est énergie cinétique :

$$E_{photon} = \phi + K$$

$$K = E_{photon} - \phi \quad = \quad 4{,}72\ \mathrm{eV} - 3{,}66\ \mathrm{eV} \quad = \quad \mathbf{1{,}06\ eV}$$

c) $v = 6{,}09 \times 10^5$ m/s

L'énergie cinétique de 1,06 eV correspond à une vitesse précise, qu'on peut trouver via l'équation :

$$K = \tfrac{1}{2} m v^2$$

On isole la vitesse v pour la calculer, et on fait la conversion de l'énergie joules pour que la vitesse soit trouvée en m/s :

$$v = \sqrt{\frac{2K}{m}} \quad = \quad \sqrt{\frac{2 \times 1{,}06\ \mathrm{eV} \times \left(\frac{1{,}602 \times 10^{-19}\ \mathrm{J}}{1\ \mathrm{eV}}\right)}{9{,}109 \times 10^{-31}\ \mathrm{kg}}} \quad = \quad \mathbf{6{,}09 \times 10^5\ \frac{m}{s}}$$

retour à la question ▲

8.20 Solution : Effet sur l'effet photoélectrique retour à la question ▲

a) $V_{arrêt}$ diminue

Réduire la fréquence du rayonnement utilisé (des photons incidents) génère des photons portant moins d'énergie. Des photons ayant moins d'énergie transfèrent évidemment moins d'énergie aux photoélectrons. Ceux-ci, dans la mesure où ils reçoivent tout de même suffisamment d'énergie pour déclencher l'effet photoélectrique, auront donc moins d'énergie cinétique. Une énergie cinétique plus faible demande un potentiel plus faible pour immobiliser l'électron.

Le potentiel d'arrêt sera donc réduit par la réduction de fréquence du rayonnement incident.

b) $V_{arrêt}$ diminue

Un travail d'extraction supérieur laissera moins d'énergie cinétique au photoélectron, pour une même énergie incidente (photon incident). Comme indiqué en a), une énergie cinétique inférieure pour le photoélectron fait en sorte qu'un potentiel inférieur parviendra à l'immobiliser.

Le potentiel d'arrêt sera donc réduit par l'augmentation du travail d'extraction du nouveau matériau.

c) $V_{arrêt}$ ne varie pas

L'augmentation de l'irradiance signifie une augmentation du nombre de photons émis par la source, par unité de temps. Cependant chaque photon porte la même énergie, la fréquence n'ayant pas changé. Un photoélectron n'absorbe toujours qu'un photon à la fois, et n'est pas influencé par l'augmentation du nombre de photons. La conséquence d'une augmentation du nombre de photons est un nombre de photoélectrons plus grand, par unité de temps, ou une probabilité plus grande, pour chaque électron exposé, de recevoir un photon déclencheur.

d) $V_{arrêt}$ ne varie pas

Le fait d'éloigner les deux électrodes du montage de l'expérience n'a aucun effet. D'une part, cette valeur n'apparaît pas dans les équations décrivant le phénomène, ce qui est suffisant pour affirmer que ça n'a aucun effet. D'un autre point de vue, c'est la différence de potentiel qui compte. Si le même potentiel s'observe entre deux électrodes plus éloignées, le champ électrique sera plus faible, et la force électrique sur l'électron également. Sa décélération sera donc plus faible, mais la distance disponible étant plus grande également (éloignement des électrodes), le résultat est le même : le photoélectron s'immobilise tout juste avant de rejoindre la seconde électrode.

retour à la question ▲

retour à la question ▲

retour à la question ▲

retour à la question ▲

8.21 Solution : Cuivre retour à la question ▲

λ_{seuil} = 264 nm

On cherche la longueur d'onde « seuil » du cuivre, pour lequel le travail d'extraction est de 4,70 eV. La longueur d'onde seuil est celle du photon possédant tout juste assez d'énergie pour fournir le travail d'extraction, sans excédent qui fournirait en plus une énergie cinétique.

On parle donc d'un photon possédant précisément une énergie de 4,70 eV. On peut donc écrire, pour ce photon :

$$E = hf_{seuil} = \frac{hc}{\lambda_{seuil}} = \phi = 4{,}70 \text{ eV}$$

On peut utiliser la valeur condensée du produit « hc » pour éviter les calculs de conversion d'énergie :

$$\lambda_{seuil} = \frac{hc}{4{,}70 \text{ eV}} = \frac{1\,240 \text{ eV·nm}}{4{,}70 \text{ eV}} = \mathbf{264\ nm}$$

retour à la question ▲

8.22 Solution : Potassium retour à la question ▲

a) $V_{arrêt}$ = 1,36 V

L'équation photoélectrique d'Einstein contient le paramètre du potentiel d'arrêt, qu'on peut isoler :

$$\frac{hc}{\lambda} = \phi + eV_{arrêt} \quad \rightarrow \quad V_{arrêt} = \frac{\frac{hc}{\lambda} - \phi}{e} \qquad (1)$$

Le travail d'extraction du potassium est de 2,29 eV. Pour une longueur d'onde de 340 nm :

$$V_{arrêt} = \frac{\frac{hc}{\lambda} - \phi}{e} = \frac{\frac{1\,240 \text{ eV·nm}}{340 \text{ nm}} - 2{,}29 \text{ eV}}{e}$$

Avant de procéder au calcul complet, on peut simplifier le terme du haut pour appliquer la relation « eV/e = V ». Il n'est donc pas nécessaire de convertir l'énergie en joules et d'utiliser la valeur de la charge élémentaire :

$$V_{arrêt} = \frac{3{,}65 \text{ eV} - 2{,}29 \text{ eV}}{e} = \mathbf{1{,}36\ V}$$

b) $V_{arrêt}$ = 0,466 V

À partir de l'équation (1) développée en a), on a, pour λ = 450 nm :

$$V_{arrêt} = \frac{\frac{hc}{\lambda} - \phi}{e} = \frac{\frac{1\,240 \text{ eV·nm}}{450 \text{ nm}} - 2{,}29 \text{ eV}}{e} = \frac{2{,}76 \text{ eV} - 2{,}29 \text{ eV}}{e} = \mathbf{0{,}466\ V}$$

c) $V_{arrêt}$ = Ø

À partir de l'équation (1) développée en a), on a, pour λ = 560 nm :

$$V_{arrêt} = \frac{\frac{hc}{\lambda} - \phi}{e} = \frac{\frac{1\,240 \text{ eV·nm}}{560 \text{ nm}} - 2{,}29 \text{ eV}}{e} = \frac{2{,}21 \text{ eV} - 2{,}29 \text{ eV}}{e} = \mathbf{-0{,}075\,7\ V}$$

Un potentiel d'arrêt négatif est incohérent avec l'effet photoélectrique. Cela signifie en fait que l'énergie du photon incident est insuffisante pour déclencher l'effet photoélectrique. Le potentiel d'arrêt n'existe donc pas.

retour à la question ▲

8.23 Solution : Élément non identifié retour à la question ▲

a) ϕ = 2,36 eV

L'équation photoélectrique d'Einstein contient le paramètre du travail d'extraction, qu'on peut isoler :

$$\frac{hc}{\lambda} = \phi + eV_{arrêt}$$

$$\phi = \frac{hc}{\lambda} - eV_{arrêt} = \frac{1\,240 \text{ eV·nm}}{367 \text{ nm}} - e \cdot 1{,}02 \text{ V} = 3{,}38 \text{ eV} - 1{,}02 \text{ eV} = \mathbf{2{,}36\ eV}$$

b) Sodium

Selon le tableau des valeurs de travail d'extraction fourni dans ce document, l'élément dont le travail d'extraction est de 2,36 eV est le sodium.

retour à la question ▲

8.24 Solution : La photodiode retour à la question ▲

λ = 355 nm

D'une part, l'énergie cinétique est égale à la différence entre l'énergie du photon incident et le travail d'extraction :

$$K_{max} = \frac{hc}{\lambda} - \phi,$$

et d'autre part elle est liée à la vitesse d'éjection du photoélectron par :

$$K_{max} = \frac{1}{2}mv^2$$

Ces deux expressions réunies permettent d'affirmer que :

$$K_{max} = \frac{hc}{\lambda} - \phi \quad = \quad = \frac{1}{2}mv^2$$

$$\lambda = \frac{hc}{\frac{1}{2}mv^2 + \phi}$$

Le travail d'extraction pour le césium est de 2,14 eV (tableau). Aussi, le terme représentant l'énergie cinétique devra être converti en électronvolts pour permettre le calcul avec la valeur du travail d'extraction :

$$\lambda = \frac{1\,240\ \text{eV·nm}}{\left[\frac{1}{2}\times(9{,}109\times10^{-31}\ \text{kg})\times\left(6{,}90\times10^{5}\ \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2\right]\times\frac{1\ \text{eV}}{1{,}602\times10^{-19}\ \text{J}} + 2{,}14\ \text{eV}} \quad = \quad \mathbf{355\ nm}$$

retour à la question ▲

8.25 Solution : Deux scénarios retour à la question ▲

a) ϕ = 4,10 eV

On décrit dans l'énoncé deux scénarios où la fréquence du photon incident varie, ce qui a pour effet de modifier également le potentiel d'arrêt d'un cas à l'autre.

Écrivons l'équation photoélectrique d'Einstein (adaptée à la fréquence plutôt qu'à la longueur d'onde) qui contient ces deux paramètres, pour chacun des scénarios (nommés scénarios #1 et #2) :

$$\frac{hc}{\lambda} = hf = \phi + eV_{arrêt} \qquad hf_1 = \phi + eV_{arrêt-1} \quad (1)$$

$$\text{et} \qquad hf_2 = \phi + eV_{arrêt-2} \quad (2)$$

Ces deux équations comportent trois inconnues, soit f_1, f_2 et ϕ. Une troisième équation, à partir de l'énoncé, permet d'établir une relation entre les deux fréquences inconnues :

$$f_2 = 1{,}50\, f_1 \quad (3)$$

On peut isoler les fréquences f_1 et f_2 dans les équations (1) et (2) pour remplacer leur expression dans l'équation (3) :

$$f_1 = \frac{\phi + eV_{arrêt-1}}{h} \qquad \text{et} \qquad f_2 = \frac{\phi + eV_{arrêt-2}}{h}$$

$$f_2 = 1{,}50\, f_1$$

$$\left(\frac{\phi + eV_{arrêt-2}}{h}\right) = 1{,}50 \times \left(\frac{\phi + eV_{arrêt-1}}{h}\right)$$

On peut alors isoler ϕ qui est alors la seule inconnue de l'équation résultante :

$$\phi + eV_{arrêt-2} = 1{,}50 \times (\phi + eV_{arrêt-1})$$

$$\phi + eV_{arrêt-2} = 1{,}50\phi + 1{,}50eV_{arrêt-1}$$

$$0{,}50\phi = eV_{arrêt-2} - 1{,}50eV_{arrêt-1}$$

$$\phi = \frac{e(V_{arrêt-2} - 1{,}50V_{arrêt-1})}{0{,}50} = \frac{e(2{,}55\text{ V} - 1{,}50 \times 0{,}332\text{ V})}{0{,}50} = \mathbf{4,10\ eV}$$

b) λ = 186 nm

La longueur d'onde la plus faible des deux scénarios est liée à la fréquence la plus élevée des deux. C'est donc le second scénario (dont la fréquence est une fois et demie plus élevée) qui implique la longueur d'onde recherchée.

Le travail d'extraction étant maintenant connu, l'équation photoélectrique d'Einstein, contenant λ, donne :

$$\frac{hc}{\lambda_2} = \phi + eV_{arrêt-2}$$

$$\lambda_2 = \frac{hc}{\phi + eV_{arrêt-2}} = \frac{1\,240\text{ eV·nm}}{4{,}10\text{ eV} + e\cdot 2{,}55\text{ V}} = \frac{1\,240\text{ eV·nm}}{4{,}10\text{ eV} + 2{,}55\text{ eV}} = \mathbf{186\ nm}$$

retour à la question ▲

retour à la question ▲

retour à la question ▲