



Physique moderne

Devoir n° 1

durée : 1h30 (2h en cas de tiers-temps)

Aucune sortie avant 1h d'épreuve

Instructions à lire avant de commencer

Sont interdits :

- les documents ;
- tous les objets électroniques (téléphone, tablette, ordinateur, montres connectées, *etc.*) à l'exception d'une calculatrice **collège** ;
- les déplacements et les échanges.

Consignes :

1. vérifiez que le sujet est composé de 5 pages, 1 tableau à la page 4 et un graphique à la page 5 ;
2. indiquez le nombre total de feuilles utilisées sur la première page de la copie ;
3. numérotez l'ensemble des feuilles de votre copie ;
4. une attention particulière sera donnée à la qualité de la rédaction ;
5. en cas d'erreur dans l'énoncé, vous l'indiquerez sur votre copie et continuerez le devoir ;
6. l'exercice 5 est un bonus ;
7. barème des bonus : entre 0 et 20.

Le barème est donné à titre indicatif

Données

- constante de Planck réduite : $\hbar = \frac{h}{2\pi} = 1,05 \times 10^{-34}$ USI (USI : Unité du Système International);
- constante de gravitation : $\mathcal{G} = 6,67 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$;
- permittivité diélectrique du vide : $\varepsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$;
- charge élémentaire : $e = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$;
- masse de l'électron : $m = 9,11 \times 10^{-31} \text{ kg}$;
- masse du proton $m_p = 1,7 \times 10^{-27} \text{ kg}$;
- $1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$;
- plage de longueur d'onde (dans le vide et l'air exprimée en nm) associée aux différentes couleurs [1] :
 - rouge [650 ; 700] — jaune [580 ; 600] — bleu [450 ; 550]
 - orange [600 ; 650] — vert [550 ; 580] — violet [400 ; 450]

Exercice 1 – Questions de cours (5 points)

1. Citer un objet (instrument, composant d'un circuit, objet de la vie quotidienne, etc.) dont la découverte (ou la construction) a nécessité (ou nécessite) l'utilisation de la physique quantique. Le fonctionnement de l'objet en question n'est pas à préciser.
2. Donner une valeur approchée de la vitesse de propagation des ondes électromagnétiques dans le vide.
3. Rappeler la formule de Planck–Einstein en définissant les différentes notations.
4. Retrouver l'unité et la dimension de la constante de Planck.

Solution 1

1. (/1) Les transistors qui composent notamment les microprocesseurs, le laser (chirurgie, mesures de précision), les horloges atomiques nécessaires pour la précision du Global Positioning System (dit GPS), certains prototypes de trains à sustentation magnétique (SCMaglev) utilisant des aimants supraconducteurs, etc. Les "panneaux solaires" sont acceptés même si les premiers modèles très répandus dans le sud de l'Europe n'utilisent pas l'effet photoélectrique. L'ordinateur quantique est également accepté même si le caractère quantique est déjà précisé par le mot!
2. (/1 : valeur et unité) $c = 3,00 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
3. (/1 : valeur et notations) $E = h\nu$ ou $E = \hbar\omega$, avec E l'énergie d'un photon (quantum d'énergie), ν la fréquence de la lumière associée et ω la pulsation (ou fréquence angulaire).
4. (/2 : unité/dimension et démonstration] La constante de Planck h s'exprime en $\text{J} \cdot \text{s}$ et a pour unité $\text{M} \cdot \text{L}^2 \cdot \text{T}^{-1}$. Voir le cours et/ou le TD pour la démonstration.

Exercice 2 – Applications directes (8 points)

Pour les trois premières questions, une expression littérale et une valeur numérique sont attendues.

1. Quelle est l'énergie E en joule et en eV d'un photon de longueur d'onde $\lambda = 0,1 \text{ nm}$?
2. Quelle est la longueur d'onde λ d'un photon d'énergie $E = 2,5 \text{ eV}$?
3. Le travail d'extraction du Tungstène est de $W_s = 4,52 \text{ eV}$.
 - 3.a) Quel est le seuil de fréquence ν_s de l'onde électromagnétique incidente permettant d'observer l'effet photoélectrique ?
 - 3.b) Cette onde électromagnétique appartient-elle au spectre visible de la lumière ? Si oui, dans quelle gamme de couleur est-elle ? Sinon, dans quelle partie du spectre est-elle ?
 - 3.c) Pour que ces électrons s'échappent du Tungstène avec une vitesse non nulle (dans le référentiel lié au métal), faut-il diminuer ou augmenter la longueur d'onde de la source utilisée dans les questions précédentes ? Justifier.

Solution 2

1. (/2) Planck–Einstein $E = h\nu$ et $c = \lambda\nu$ donnent

$$E = \frac{hc}{\lambda} = 1,98 \times 10^{-15} \text{ J} = 1,24 \times 10^4 \text{ eV} = 12,4 \text{ keV}.$$

2. (/2) $\lambda = hc/E = 4,95 \times 10^{-7} \text{ m} = 495 \text{ nm} \approx 5 \times 10^{-7} \text{ m}$
3. 3.a) (/1) $\nu_s = W_s/h = 1,1 \times 10^{15} \text{ Hz} = 1,1 \times 10^3 \text{ THz}$
- 3.b) La longueur d'onde correspondante est $\lambda_s = c/\nu_s = \frac{hc}{W_s} = 274 \text{ nm}$. Cette longueur est en dehors du spectre visible et se situe dans les UV.
- 3.c) (/2 : tout le raisonnement) Pour que l'énergie cinétique des électrons arrachés soit non nulle, il est nécessaire d'augmenter l'énergie des photons incidents. Celle-ci étant inversement proportionnelle à la longueur d'onde, il faut donc **diminuer** la longueur d'onde.

Exercice 3 – Action typique (7 points)

1. On considère le mouvement de révolution de la Terre (de masse $M_T = 6 \times 10^{24}$ kg) autour du Soleil (de masse $M_S = 2 \times 10^{30}$ kg). On supposera que l'orbite est circulaire de rayon $R = 1,5 \times 10^8$ km.
 - 1.a) Donner l'expression littérale d'une action typique S de ce phénomène.
 - 1.b) Faire l'application numérique en unité de h et conclure sur la nature classique ou quantique du phénomène.
2. Contrairement aux liquides visqueux, l'hélium superfluide dans un vase n'est pas entraîné lorsque ce dernier est mis en rotation. En revanche, on observe des tourbillons d'une taille de l'ordre de $d = 0,1$ mm et qui disparaissent au bout de $\tau = 0,1$ s.
Montrer que l'explication de ce phénomène nécessite l'utilisation de la physique quantique.

Solution 3

1. 1.a) (/3) Par analyse dimensionnelle on trouve $[S_{\text{typ}}] = [\text{Force}] \cdot L \cdot T$. Soit en notant $\tau = 1$ an la période de rotation de la Terre autour du Soleil

$$S_{\text{typ}} \propto \mathcal{G} M_T M_S \tau / d.$$

- 1.b) (/2 : valeur en unité de h et conclusion) L'application numérique donne

$$S_{\text{typ}} \sim 1,7 \times 10^{41} \text{ J} \cdot \text{s} \approx 2,6 \times 10^{74} h.$$

Très clairement $S_{\text{typ}} \gg h$ et l'étude du mouvement de rotation de la Terre autour du Soleil en 1 an peut se faire dans le cadre classique c'est-à-dire sans utiliser la physique quantique (ni la relativité restreinte puisque la vitesse de la Terre est très petite devant celle de la lumière).

2. (/2) Par analyse dimensionnelle on trouve que pour l'hélium superfluide $S_{\text{typ}} \propto M d^2 / \tau$, avec $M \approx 4m$ est la masse d'un atome d'hélium (4) composé de quatre nucléons. On trouve $S_{\text{typ}} \sim 6,8 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} \sim h$. Malgré le caractère "mésoscopique" du phénomène (ni microscopique ni macroscopique), la valeur de l'action typique suggère que le phénomène doit être traité à l'aide de la physique quantique.

Exercice 4 – Détermination de la constante de Planck par Millikan

En 1923, Robert Millikan obtient le prix Nobel pour "son travail sur la charge élémentaire électrique et l'effet photoélectrique". Au cours de son allocution devant le comité Nobel le 23 mai 1924, il expose [6] une partie de ses travaux lui ayant permis de calculer la constante de Planck h à partir de ses mesures expérimentales synthétisées sur la figure de la page 5 et représentant le potentiel d'arrêt (exprimé en V) en fonction de la fréquence (exprimée en Hz) de la lumière incidente.

Deux remarques importantes :

- i sur le graphique, la courbe expérimentale à considérer est celle quasiment diagonale : la courbe en haut à gauche et en pointillés, ne doit donc pas être considérée ;

ii pour différentes raisons, les calculs en bas à droite du graphique ne doivent pas être considérés (sauf pour le second bonus).

1. Expliquer en quoi consiste l'effet photoélectrique en utilisant le vocabulaire scientifique.
2. Détermination de h
 - 2.a) En supposant que la lumière est constituée de quanta d'énergie et à l'aide d'un raisonnement sur la conservation de l'énergie d'un électron, établir une relation faisant intervenir le potentiel d'arrêt V_0 , la charge élémentaire e , la fréquence de la source de lumière ν , le travail d'extraction W_S et la constante de Planck h .
 - 2.b) À quoi correspond h sur le graphique de la page 5 ?
 - 2.c) À partir de la relation établie et de la courbe, déterminer une valeur de h . La démarche devra être décrite avec précision.
3. Bonus (les deux questions sont indépendantes)
 - 3.a) À partir du tableau de, la page suivante et du graphique, déterminer quel métal a utilisé Millikan pour son expérience. La réponse devra être justifiée avec précision.
 - 3.b) À partir du même graphique, Millikan trouve pour la constante de Planck la valeur $6,56 \times 10^{-27}$. Commenter.

Métal	Travail d'extraction en eV
Sodium	2,28
Cobalt	3,90
Aluminium	4,08
Plomb	4,14
Zinc	4,31
Fer	4,50
Cuivre	4,70
Argent	4,73
Platine	6,35

TABLE 1 – Exercice 4 : valeurs du travail d'extraction (exprimé en eV) de quelques métaux [3].

Exercice 5 – Culture générale

1. Qui est l'auteur de *À la recherche du temps perdu* ?
2. Quelle est la première phrase de *À la recherche du temps perdu* ?

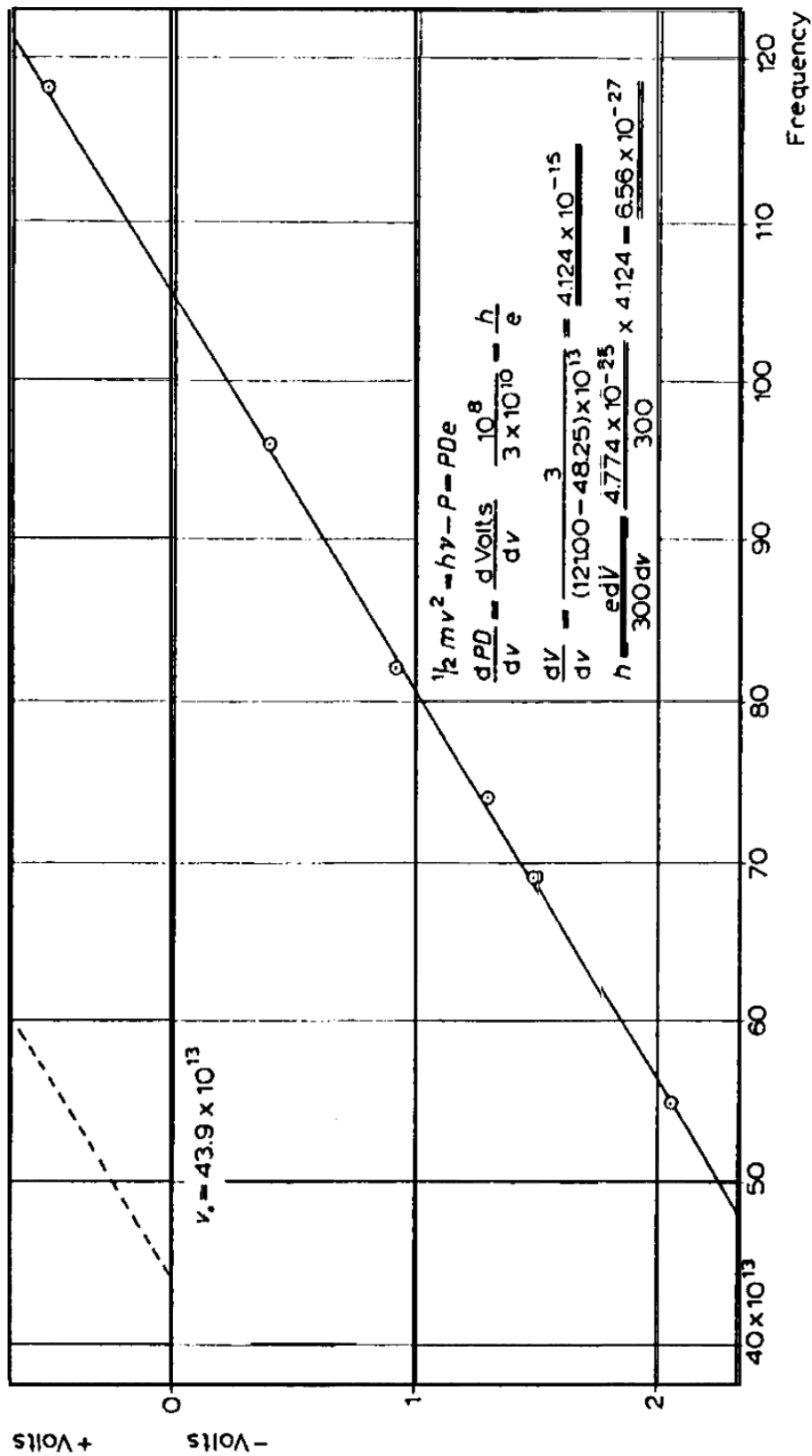


FIGURE 1 – Exercice 4 : graphique issu de l’allocution de R. Millikan à la réception du prix Nobel [6]. La même figure avait été publiée auparavant dans un article [5].

3. Dissertation : la physique quantique décrit-elle la réalité ?

Solution 5

1. (0 point) Marcel Proust (centenaire de son décès en 2022).

2. (0 point) Longtemps, je me suis couché de bonne heure.

3. Propositions de lectures :

— "Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?"; Einstein, Podolsky & Rosen; *Phys. Rev.*, **47**, 777 (15 mai 1935)

— "Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?"; Niels Bohr; *Phys. Rev.*, **48**, 696 (15 octobre 1935)

— "Physique quantique et représentation du monde"; Erwin Schrödinger (Seuil)

Propositions de vidéos (discours pour la réception du [Prix Nobel de physique 2022](#)) :

— [Alain Aspect](#)

— [John Clauser](#)

— [Anton Zeilinger](#)

Références

[1] Article *Colour* dans [Britannica](#) (consulté le 15 mars 2023)

[2] *Mécanique quantique*, Claude Aslangul, De Boeck supérieur (2007).

[3] *Physique*, Eugene Hecht, De Boeck supérieur (1999).

[4] *Quantique : rudiments*, Jean-Marc Lévy-Leblond & Françoise Balibar, Dunod (2007).

[5] *A Direct Determination of Planck's "h"*, Robert A. Millikan, *Phys. Rev.*, **7**, 355 (1^e mars 1916).

[6] *The Electron and the Light-Quant from the Experimental Point of View*, Robert A. Millikan, allocution devant le comité Nobel le 23 mai 1924.