

Les différents exercices ont été récupérés du site des olympiades internationales de la physique au lien suivant :

<http://www.sciencesalecole.org/ipho-Annales-test-national/> Les corrigés se trouvent également au lien suivant.

I QCMs

Extrait des QCM 2013

1. On mesure le rayonnement d'un corps noir de température T_1 avec un petit récepteur situé à la distance d_1 de ce corps. A quelle distance d_2 faut-il placer le récepteur pour recevoir la même puissance si le corps est désormais à la température $T_2 = 2T_1$?
 - a) $d_2 = 2d_1$
 - b) $d_2 = 4d_1$
 - c) $d_2 = 8d_1$
 - d) $d_2 = 16d_1$
5. Imaginons une étoile dont le maximum d'émission correspond à la longueur d'onde $\lambda = 250$ nm. Quelle serait sa température en surface, sachant que celle du Soleil est $T_S = 5,8 \cdot 10^3$ K pour un maximum d'émission correspondant à $\lambda_S = 500$ nm ?
 - a) $2,3 \cdot 10^4$ K
 - b) $4,3 \cdot 10^3$ K
 - c) $1,2 \cdot 10^4$ K
 - d) $2,9 \cdot 10^3$ K

Extrait des QCM 2014

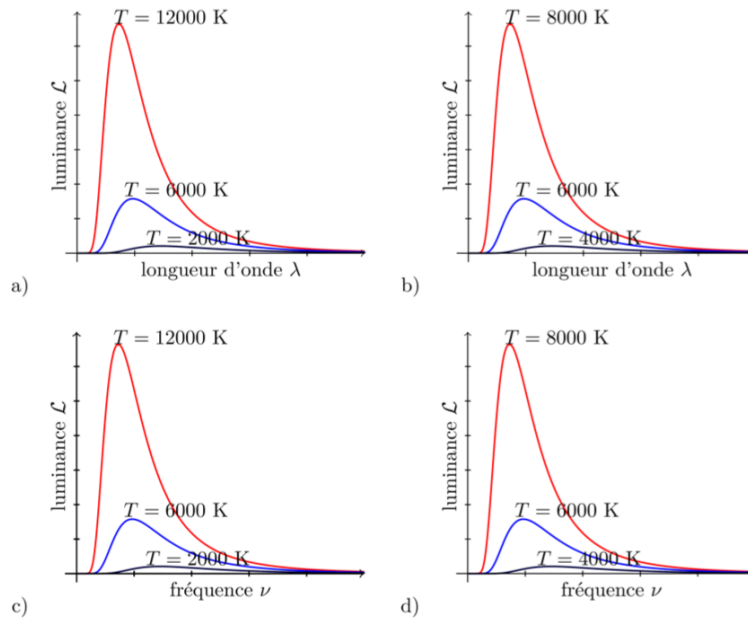
9. Les niveaux d'énergie de l'atome d'hydrogène peuvent se calculer de la façon suivante $E_n = \frac{-13,6\text{eV}}{n^2}$. On peut dire que lorsqu'on augmente la valeur de n :
 - (a) les niveaux sont de plus en plus éloignés les uns des autres
 - (b) la fréquence des radiations émises pour passer du niveau n au fondamental augmente
 - (c) la longueur d'onde des radiations émises pour passer du niveau n au fondamental augmente
 - (d) aucune des réponses précédentes
17. On considère une particule quantique libre, confinée sur une certaine longueur d'un axe (Ox). Son énergie est quantifiée, on numérote les niveaux d'énergie en partant du niveau le plus bas, noté E_1 . Comment s'exprime l'énergie du n^{e} niveau ?
 - (a) $E_n = \frac{E_1}{n^2}$
 - (b) $E_n = \frac{E_1}{n}$
 - (c) $E_n = nE_1$
 - (d) $E_n = n^2E_1$
19. La grandeur $\sqrt{\frac{\hbar G}{c^5}}$ avec $\hbar = \frac{h}{2\pi}$ la constante de Planck réduite, c la vitesse de la lumière et G la constante de gravitation universelle est
 - (a) un temps
 - (b) une masse
 - (c) une énergie
 - (d) une longueur

Extrait des QCM 2015

Q12. A quoi est homogène $\frac{\varepsilon_0 h^2}{\pi m e^2}$, où h est la constante de Planck ?

- (a) une énergie
- (b) une quantité de mouvement
- (c) une longueur
- (d) un temps

Q16. Parmi les graphes suivants représentant la luminance spectrale d'un corps noir à une température T , donnée par la loi de Planck, lequel est correct ?



- (a) figure a
- (b) figure b
- (c) figure c
- (d) figure d

Extrait des QCM 2016

8. On imagine deux étoiles sphériques A et B de même luminosité (c.-à-d. qu'elles émettent la même puissance lumineuse), mais dont les températures en surface varient du simple au double : $T_B = 2T_A$. Que peut-on dire du rayon de l'étoile B par rapport à celui de l'étoile A ?

- (a) $R_B = 4R_A$
- (b) $R_B = 2R_A$
- (c) $R_B = R_A/2$
- (d) $R_B = R_A/4$

Extrait des QCM 2017

Q6. On suppose que le rayonnement du Soleil peut être assimilé à celui d'un corps noir à la température de 6000 K . Son spectre d'émission atteint son maximum pour une longueur d'onde de 500 nm . Quel est l'ordre de grandeur de la longueur d'onde du maximum d'émission d'un objet, considéré également comme un corps noir, à la température de 300 K ?

- (a) $10\text{ }\mu\text{m}$
- (b) 10 mm
- (c) $100\text{ }\mu\text{m}$
- (d) 1 m

Extrait des QCM 2018

Q2. Une étoile a une température de surface en kelvins égale à la moitié de celle du Soleil. Sa puissance rayonnée est 400 fois celle du Soleil.

Quel est le rapport du rayon R de cette étoile sur le rayon du Soleil R_{Soleil} ?

- (a) 5
- (b) 80
- (c) $6,4 \cdot 10^4$
- (d) 25

Q12. On cherche à rompre une liaison covalente d'énergie molaire $E_{lc} \approx 350 \text{ kJ.mol}^{-1}$ avec un rayonnement électromagnétique.

Quelle condition doit vérifier le rayonnement électromagnétique pour rompre cette liaison covalente ?

- (a) Sa longueur d'onde $\lambda > \frac{hcN_A}{E_{lc}}$
- (b) Sa longueur d'onde $\lambda < \frac{hc}{E_{lc}}$
- (c) Le rayonnement électromagnétique est dans le visible.
- (d) Le rayonnement électromagnétique est dans l'ultraviolet.

Extrait des QCM 2019

Q3. Un corps noir à la température T_1 émet une puissance radiative de 10 mW.

Si le même corps noir est placé à la température $2 T_1$, quelle sera la puissance radiative émise par celui-ci ?

- (a) 10 mW ;
- (b) 20 mW ;
- (c) 80 mW ;
- (d) 160 mW.

Q20. Au niveau du sol terrestre, la puissance surfacique du rayonnement solaire est de 500 W.m^{-2} . Un individu regarde le Soleil pendant 1,0 s, à travers un filtre sélectionnant la longueur d'onde de 504 nm, correspondant au maximum d'émission du Soleil. Le filtre ne laisse passer que 0,001% de l'énergie solaire et le diamètre d'un oeil humain est de 2,0 mm.

Combien de photons N voit l'individu ?

- (a) $N = 4 \cdot 10^{12}$;
- (b) $N = 4 \cdot 10^{10}$;
- (c) $N = 8 \cdot 10^{15}$;
- (d) $N = 8 \cdot 10^{10}$.

Extrait des QCM 2021

Q15. Gamma Virginis est une étoile de la constellation de la Vierge qui appartient à la séquence principale des étoiles comme le Soleil : elle est de masse environ 1,7 fois celle du Soleil, de température de surface environ 1,3 fois celle du Soleil et de rayon environ 1,4 fois celui du Soleil. Quel est le rapport entre la puissance émise par Gamma Virginis et celle émise par le Soleil ?

- (a) 1,6 ;
- (b) 6 ;
- (c) 10 ;
- (d) 16.

II Annales 2013. Exercice 2 : Etude du fond diffus cosmologique

Le fond diffus cosmologique est le nom donné au rayonnement électromagnétique issu de la période chaude et dense peu après le Big Bang (380 000 ans). Ce rayonnement assimilable à celui d'un corps noir a été dilué et refroidi par l'expansion de l'Univers et correspond à l'émission des premiers photons. En effet, à cette période, a eu lieu la recombinaison entre les électrons et les protons pour former les premiers atomes. Ce phénomène se produit au moment où la température de l'Univers descend au-dessous du seuil sous lequel l'énergie moyenne des photons les plus énergétiques est en dessous de l'énergie d'ionisation.

1. Le spectre de rayonnement d'une étoile de température de surface T , assimilé à une émission thermique, est donné par la loi de Planck qui donne la puissance rayonnée par unité de surface de l'étoile dP_u entre les longueurs d'onde λ et $\lambda + d\lambda$:

$$dP_u = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda k_B T}\right) - 1} d\lambda$$

où h est la constante de Planck et k_B la constante de Boltzmann. On appelle λ_m la valeur de λ pour laquelle la fonction $\frac{dP_u}{d\lambda}$ présente un maximum.

Donner une expression approchée de la relation liant λ_m , T , h , c et k_B . On pourra supposer que, au voisinage de ce maximum, $\exp\left(\frac{hc}{\lambda k_B T}\right) \gg 1$, avant de vérifier la validité de cette approximation.

2. En déduire que $\lambda_m T$ est une constante dont on donnera la valeur. Cette loi est appelée loi de Wien.
3. L'Univers étant majoritairement composé d'hydrogène, calculer la température moyenne de l'Univers 380 000 ans après le Big-Bang en sachant que l'énergie d'ionisation vaut 13,6 eV.
La valeur calculée n'est qu'une approximation car seule une fraction de photons doit posséder une énergie au-dessus de l'énergie d'ionisation en raison de la quantité élevée de photons par noyau atomique (de l'ordre de un milliard). La valeur réelle est 3000 K.
4. A tout instant t , l'Univers peut être considéré comme un émetteur thermique à la température $T(t)$ (le rayonnement émis est appelé « fond diffus cosmologique »). On montre, qu'au cours de l'évolution de l'Univers, la longueur d'onde d'un photon quelconque varie proportionnellement aux dimensions caractéristiques de l'Univers. En déduire qu'un Univers en expansion refroidit.
5. Quelle est la température actuelle de l'Univers si la longueur d'onde du maximum de l'émission est égale à 1,1 mm ? Dans quel domaine spectral se trouve ce maximum d'émission ?

III Annales 2014. Exercice 1 : Mesurer l'action de la gravité sur de l'antimatière

Plusieurs projets d'expériences cherchent actuellement à mesurer l'effet d'un champ de gravitation sur l'antimatière. On sait actuellement fabriquer des antiprotons et les recombinaison avec un positron (ou antiélectron) pour fournir quelques atomes d'antihydrogène $\overline{H}$. Le projet GBAR envisage de mesurer l'effet de la gravité sur ces antiatomes. Pour cela, ce projet propose de faire capturer un autre positron à ces antiatomes, de façon à produire des $\overline{H}^+$, ions antihydrogènes symétriques de l'ion H^- par la transformation matière- antimatière, puis de refroidir ces quelques ions $\overline{H}^+$ de façon à obtenir un gaz ionique ultrafroid dans un piège, pour les laisser tomber (en arrêtant brutalement de les piéger) sous l'effet de la gravité terrestre, et de mesurer leur temps de chute T entre l'instant où le piège à ions est arrêté et celui où les anti-ions s'annihilent sur un détecteur situé à une distance L . On se propose ici de déterminer les performances ultimes de cette méthode.

Remarque : Une antiparticule possède la même masse que la particule de matière à laquelle elle est associée.

1. Justifier que l'ion antihydrogène porte une charge $+e$.
2. Considérons un ion placé au centre du piège, soit à la distance L du détecteur, sans vitesse initiale verticale ($v = 0$). Calculer le temps de chute T de l'ion et montrer que sa mesure permet de déterminer le champ de pesanteur terrestre pour l'antimatière, appelé $\overline{g}$, si on connaît la distance L . En déduire l'expression de $\overline{g}$, en fonction de L et T .
3. Malheureusement on ne peut pas expérimentalement préparer le gaz d'anti-ions $\overline{H}^+$ avec des incertitudes Δz_0 sur la position des ions (et donc sur leur hauteur de chute) et Δv sur leur vitesse verticale aussi faibles qu'on le souhaite. Ainsi la position initiale z_0 d'un ion par rapport au centre du piège peut prendre différentes valeurs, caractérisées par une certaine dispersion de z autour de 0 : la valeur moyenne de z_0 (moyennée sur tous les ions) est nulle, mais la valeur de z_0 fluctue d'un ion à un autre sur une certaine plage caractérisée par l'incertitude Δz_0 . De même la composante verticale v de la vitesse des ions fluctue d'un ion à l'autre autour de la valeur moyenne 0, sur une certaine plage caractérisée par son incertitude Δv . Il est résulte que la mesure du temps de chute, et donc la valeur de $\overline{g}$ qui en est tirée par la relation obtenue à la question 2, fluctuent sur des plages de valeurs caractérisées par les incertitudes associées ΔT et $\Delta \overline{g}$.
 - (a) On considère maintenant un ion qui, à l'instant où le piège est arrêté, est situé à la cote z_0 (donc à la distance $L + z_0$ du détecteur) et est animé d'une vitesse verticale v . Déterminer son temps de chute T en fonction de z_0 , v , L et $\overline{g}$. On pourra simplifier cette expression en remarquant que z_0 et v sont petits respectivement par rapport à L et $\sqrt{2L\overline{g}}$ vitesse caractéristique du problème et en utilisant $(1 + \varepsilon)^\alpha \simeq 1 + \alpha\varepsilon$ pour $\varepsilon \ll 1$ (on prendra garde à ne garder que les termes d'ordre le plus bas en v et z_0).
 - (b) Montrer que l'incertitude relative sur T est reliée aux incertitudes Δz et Δv par la relation :

$$\frac{\Delta T}{T} = \sqrt{\left(\frac{\Delta z_0}{2L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta v}{\sqrt{2L\overline{g}}}\right)^2}$$

Remarque : On rappelle que l'incertitude ΔX d'une grandeur $X(x_1, x_2)$ dépendant de deux grandeurs x_1 et x_2 d'incertitudes Δx_1 et Δx_2 s'écrit :

$$\Delta X = \sqrt{\left(\frac{\partial X}{\partial x_1} \Delta x_1\right)^2 + \left(\frac{\partial X}{\partial x_2} \Delta x_2\right)^2}$$

où $\frac{\partial X}{\partial x_1}$ est la dérivée partielle de X par rapport à x_1 , c'est-à-dire la dérivée de X par rapport à x_1 , la variable x_2 étant fixée.

(c) En déduire l'incertitude relative $\frac{\Delta \bar{g}}{\bar{g}}$ sur la valeur de Ag déduite de la mesure de T .

4. En supposant que les ions $\overline{H}^+$ aient été préparés dans l'état quantique qui permet de définir le plus précisément leur position et leur vitesse verticale, quelle est la relation vérifiée par Δz et Δv ?
5. Quelle est alors la précision relative sur $\bar{g}$ la meilleure qu'on puisse atteindre par la méthode de mesure envisagée dans le projet GBAR ? On prendra $L = 1$ m et $\bar{g} = g$.

Cette précision ultime ne peut être atteinte dans les conditions expérimentales actuellement retenues. Néanmoins il est possible d'atteindre une précision relative de l'ordre du % sur Ag .

IV Annales 2014. Exercice 2 : Microscopie à effet tunnel

Le développement du microscope à effet tunnel (STM pour Scanning tunneling microscope) est considéré comme une révolution dans les domaines atomiques et moléculaires. La microscopie à effet tunnel est une technique expérimentale qui permet de sonder la matière à l'échelle atomique. Elle a été inventée dans les années 1980 par Heinrich Rohrer et Gerd Binnig au laboratoire de recherche d'IBM. Pour cette innovation révolutionnaire, ils ont reçu le Prix Nobel de Physique en 1986. Le concept instrumental du STM est d'aller sonder le champ proche électronique, constitué par effet tunnel à la surface d'un matériau conducteur. L'effet tunnel est un effet quantique : des électrons ont une probabilité de présence non nulle dans une zone où l'énergie potentielle est supérieure à l'énergie totale. Ils peuvent ainsi franchir une barrière d'énergie potentielle. Lorsque les électrons qui circulent dans un métal arrivent à sa surface, tout se passe comme s'ils avaient la possibilité de sortir du métal, pour y revenir ensuite. Le principe de fonctionnement du STM est le suivant : une pointe, terminée par un atome unique vient balayer la surface d'un échantillon conducteur. Une fois qu'elle en est suffisamment proche, la pointe et le champ d'électrons tunnel de l'échantillon forment un circuit électrique porté à un très faible potentiel.

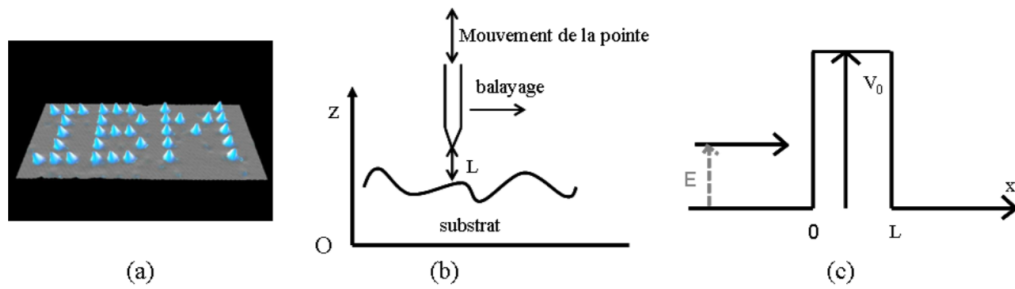


FIGURE 1: (a) En Novembre 1989 des chercheurs d'IBM ont démontré que la technologie de microscopie par effet tunnel peut être utilisée pour manipuler la matière atome par atome. Comme exemple de cette technique, ils ont placé des atomes individuels sur un substrat en formant les trois lettres "IBM" (b) Déplacement de la pointe le long de la surface du substrat (c) Modélisation de la barrière de potentiel

- On considère le mouvement d'une particule dans la barrière de potentiel représentée sur la figure 1(c) : $V = 0$ pour $x < 0$, $V = V_0$ pour $0 < x < L$ et $V = 0$ pour $x > L$. Une particule classique d'énergie totale $E < V_0$ arrive sur la barrière de potentiel. Que se passe-t-il ?
- Une particule quantique peut, en arrivant sur la barrière faire une transition virtuelle vers un état d'énergie $E' \neq E$. Si $E' > V_0$ la particule peut pénétrer dans la région $x > 0$. On admet qu'elle ne dispose pour cela que d'un temps au plus égal à $\tau = \frac{\hbar}{E' - E}$.

- Montrer que la distance maximale que peut parcourir la particule est $d_M = \sqrt{\frac{\hbar^2}{2m(V_0 - E)}}$. Dans quel cas la particule peut-elle traverser la barrière de potentiel ?
- Donner la valeur de d_M dans le cas où $V_0 - E = 4 \text{ eV}$.

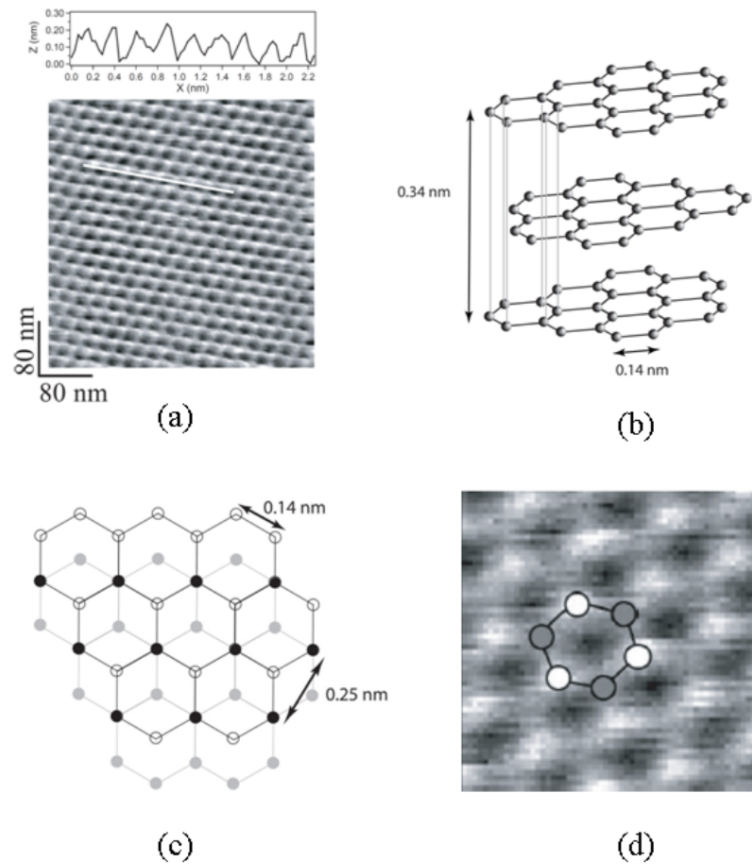


FIGURE 2: (a) bas : image par STM de la surface du graphite, haut : profil le long de la ligne blanche tracée sur l'image en dessous (b) Structure en feuillets du graphite (c) vue du dessus de ce solide (d) image haute résolution du graphite.

3. Dans le cas d'un microscope, on applique une tension entre la pointe et l'échantillon. On assimile le passage des électrons de l'échantillon conducteur vers une fine pointe en métal au franchissement d'une barrière de potentiel. Il se produit alors un courant tunnel proportionnel à la tension appliquée et à e^{-2L/d_M} . Expliquer alors qualitativement le principe du microscope à effet tunnel. En particulier, décrire les deux modes de fonctionnement possibles : distance pointe/surface L constante ou pointe fixe par rapport à l'axe (Oz) (voir figure 1 (b)) ?
4. On étudie le graphite. Sa structure est constituée de feuillets hexagonaux non compacts, nommés graphènes (voir figure 2 (b)).
 - (a) On fait l'image sa surface à l'aide d'un microscope à effet tunnel. Les zones claires sont des bosses et les zones sombres sont des creux. (figure 2 (a)). A l'aide de l'analyse du profil le long du trait blanc (graphique en haut de la figure 2 (a)), on peut déterminer la distance d entre deux maxima. En donner une estimation.
 - (b) La distance entre deux atomes de carbone voisins vaut : $a = 0.14$ nm (voir figure 2 (c)). En s'aidant des figures 2 (c) et (d), expliquez pourquoi la distance d entre deux maxima est différente de la longueur a ? Proposez en particulier une explication à la différence d'intensité du signal pour les différents atomes de carbone imagés à la figure 2 (d).