

A. Cinématique et dynamique

Mouvement d'une particule dans un champ de force constant

Exercice A1 : La catapulte

Un jouet permet de catapulter des pierres. Les pierres sont éjectées d'un point O avec une vitesse initiale \vec{v}_0 faisant un angle α avec le plan horizontal. Elles retombent 2 m plus loin au bout de 1 s sur le même plan horizontal passant par O. Déterminez la valeur de l'angle α . ($\alpha = 67,8^\circ$)

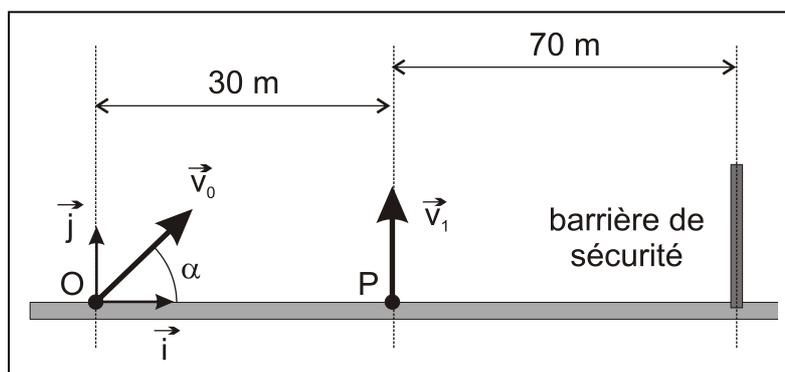
Exercice A2 : Chute de pierres

Jean étudie la chute de deux pierres : il laisse tomber la première du haut d'un immeuble de hauteur h égale à 20 m sans vitesse initiale et mesure la durée de la chute. Il lance ensuite la deuxième pierre avec une vitesse initiale horizontale v_0 .

1. Envisager deux repères : origine au pied de l'immeuble et origine au point de lancement des pierres. Établir les équations horaires de chacune des deux pierres dans chacun des deux repères!
2. Déterminer la durée de chute de chacune des pierres. Dépend-elle du repère ? ($\Delta t = 2,02$ s)
3. Aurait-on obtenu la même durée de chute si la vitesse initiale \vec{v}_0 n'avait pas été horizontale ? Motiver !

Exercice A3 : Feu d'artifice

Deux fusées A et B sont tirées simultanément à partir du sol. La fusée A part du point O, origine du repère (O, \vec{i}, \vec{j}) à l'instant $t = 0$, avec la vitesse initiale v_0 située dans un plan vertical Oxy et faisant un angle α avec l'axe horizontal. La fusée B est tirée du point P avec une vitesse verticale v_1 .



On donne : $v_0 = 40$ m/s ; $v_1 = 42$ m/s.

1. Établir les équations horaires de chacune des deux fusées dans le repère (O, \vec{i}, \vec{j}) .
2. Les deux fusées explosent au bout de 5 s. Déterminer α pour que l'explosion de la fusée A ait lieu à la verticale du point P. ($\alpha = 81,4^\circ$)
3. Déterminer la distance d qui sépare les deux fusées au moment de l'explosion ? ($d = 12,3$ m)
4. Si la fusée A n'explose pas, à quelle distance du point O retombe-t-elle ? La barrière de sécurité étant disposée comme sur la figure, les spectateurs sont-ils en sécurité ? ($x = 48,2$ m)

Exercice A4 : Le lanceur de poids

Un athlète a lancé le poids à une distance $d = 21,09$ m. A l'instant $t = 0$, correspondant à l'instant du lancer, le poids se trouve à une hauteur h de 2 m au-dessus du sol et part avec une vitesse initiale v_0 faisant un angle α de 45° avec l'axe horizontal. Le poids est assimilé à un objet ponctuel.

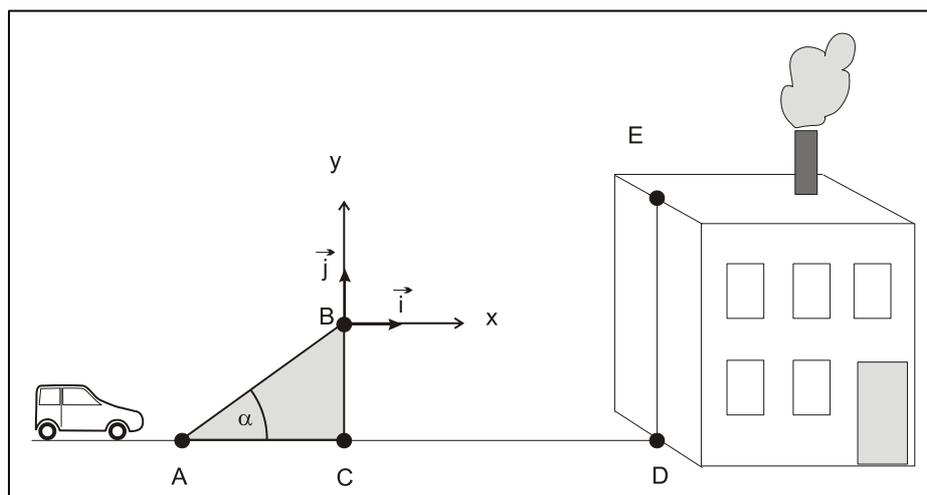
1. Etablir les équations horaires et l'équation cartésienne de la trajectoire en fonction de h , α , g et v_0 .
2. Déterminer la valeur de la vitesse initiale en fonction de h , α , g et d . La calculer numériquement. ($v_0 = 13,7$ m/s)
3. Combien de temps le poids reste-t-il dans les airs ? ($t = 2,17$ s)
4. Déterminer la hauteur maximale atteinte par le poids au cours de sa trajectoire. ($y_{\max} = 6,82$ m)
5. Le point d'impact sur le sol est-il le plus loin possible compte tenu de la vitesse initiale ? Motiver. (Indication : calculer la nouvelle distance d' pour un angle de 43° .)

$$(d' = 21,16 \text{ m pour } 43^\circ)$$

Exercice A5 : Le cascadeur

Un cascadeur doit sauter avec sa voiture (assimilée à une masse ponctuelle) sur le toit en terrasse d'un immeuble.

Pour cela, il utilise un tremplin ABC formant un angle α avec le sol horizontal et placé à la distance CD de l'immeuble. A l'instant initial le centre d'inertie M de la voiture quitte le point B (origine du repère) et il est confondu avec le point E à l'arrivée sur le toit. On néglige les frottements.



On néglige les frottements.

1. Etablir, dans le repère (B, \vec{i}, \vec{j}) du schéma, les équations du centre d'inertie M du système. Établir l'équation cartésienne de la trajectoire de M entre B et E.
2. Le centre d'inertie de la voiture doit atterrir sur le toit en E avec une **vitesse horizontale**. Etablir les expressions littérales de t_E , x_E et y_E en fonction de v_0 et de α . Montrer que $y_E/x_E = \frac{1}{2} \tan \alpha$ et en déduire numériquement la valeur de α . ($\alpha = 14,9^\circ$)
3. Calculer en km/h la valeur de la vitesse v_B au sommet du tremplin pour réussir la cascade.

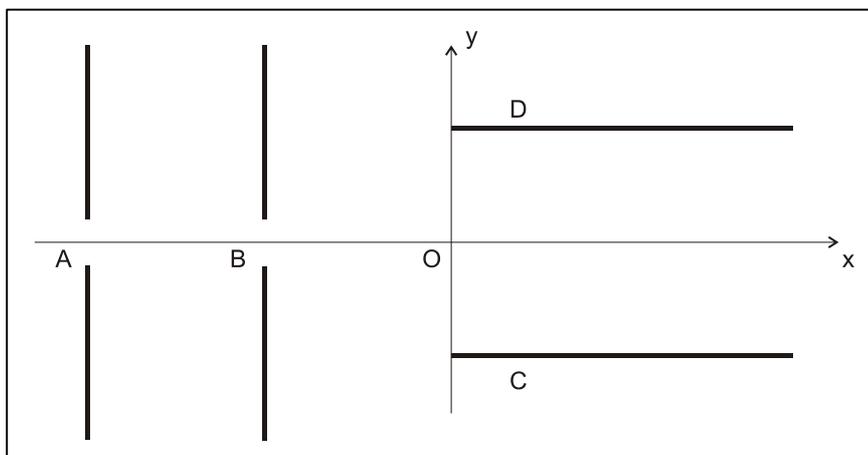
$$(v_B = 24,4 \text{ m/s})$$

Données: $CD = 15$ m, $BC = 8$ m; $DE = 10$ m.

Exercice A6 :

Un faisceau de particules α (= noyaux ${}^4_2\text{He}$) de poids négligeable et de charge $+2e$ parcourt le trajet suivant :

- En A, les particules entrent avec une vitesse négligeable par un trou entre deux armatures verticales aux bornes desquelles règne une tension U_1 . Déterminez la polarité des plaques pour que les particules soient accélérées. Ajoutez sur la figure le champ électrique \vec{E}_1 et la force électrique \vec{F}_1 que subit chaque particule.



- Déterminez U_1 pour que les particules sortent en B avec une vitesse de $5 \cdot 10^5$ m/s. ($U_1 = 2592$ V)
- Les particules se déplacent à vitesse constante de B jusqu'en O, origine d'un repère (Ox, Oy), et se trouvant au milieu des deux armatures C et D. Indiquez, en justifiant votre réponse, la polarité des plaques pour que les particules soient déviées vers le haut. Ajoutez sur la figure le champ électrique \vec{E}_2 et la force électrique \vec{F}_2 sur chaque particule.
- Etablissez les équations horaires et l'équation cartésienne pour une particule.
- Déterminez la tension U_2 à établir entre C et D pour que les particules sortent au point S d'ordonnée $y_S = 1$ cm, sachant que les armatures sont longues de 5 cm et distantes de 4 cm.

$$(U_2 = 1659 \text{ V})$$

Exercice A7 :

Une particule α pénètre dans le champ électrostatique uniforme créé par deux armatures parallèles et horizontales de longueur 10 cm et distantes de 6 cm. La particule pénètre au milieu des 2 armatures avec une vitesse $v_0 = 3 \cdot 10^5$ m/s qui fait un angle de 30° (vers le haut) avec l'horizontale.

- Faites une figure soignée et précisez la polarité des armatures pour que la particule soit déviée vers le bas.
- On néglige le frottement et le poids de la particule. Déterminez son accélération et déduisez-en les équations paramétriques et cartésienne (formules). Précisez la nature du mouvement et de la trajectoire.
- Déterminez la tension U qu'il faut appliquer aux armatures pour que la particule sorte du champ électrostatique à la même hauteur qu'elle y est entrée (c.-à-d. $y = 0$). ($U = 970$ V)
- Calculez la tension accélératrice U_{acc} qui a été nécessaire pour amener la particule en question à la vitesse de $3 \cdot 10^5$ m/s à partir du repos. ($U_{acc} = 933$ V)

Mouvement d'une particule soumise à une force radiale**Exercice A8 : Champ gravitationnel**

Lorsqu'on double d'altitude d'un satellite terrestre, le champ gravitationnel qu'il subit diminue de moitié. Déterminez les deux altitudes en question ainsi que la valeur du champ gravitationnel qui y règne.

$$(z_1 = 4,50 \cdot 10^3 \text{ km} ; z_2 = 9,01 \cdot 10^3 \text{ km} ; G_1 = 3,37 \text{ N/kg} \quad G_2 = 1,69 \text{ N/kg})$$

Exercice A9 : Satellite

Il n'y a pas d'atmosphère sur la Lune ; aussi, pour se déplacer sur de grandes distances, est-il impossible de prendre l'avion ! On envisage donc de satelliser un véhicule sur une orbite circulaire très basse à une altitude de $z = 2,5 \text{ km}$ (la trajectoire prévue ne rencontre pas de montagne). Sachant que le rayon lunaire vaut 1737 km et que la masse de la Lune vaut $1/81^{\text{ème}}$ de la masse de la Terre, déterminer

- la valeur du champ gravitationnel à la surface de la Lune, $(G_0 = 1,62 \text{ N/kg})$
- la vitesse que doit avoir le véhicule sur son orbite très basse par rapport à un repère « sélénocentrique », $(v = 1,68 \text{ km/s})$
- la période de révolution du véhicule. $(T = 1 \text{ h } 49 \text{ min})$

Exercice A10 : Masse du Soleil

Le repère de Copernic est défini de la façon suivante : l'origine correspond au centre d'inertie S du Soleil et trois axes sont dirigés vers trois étoiles fixes (donc très éloignées). Dans ce repère, la Terre est assimilable à un point, décrivant (en première approximation) une orbite circulaire, de centre S, de rayon $r = 1,498 \cdot 10^{11} \text{ m}$ et de période de révolution de $365,25 \text{ d}$.

- Donner l'expression de la force d'interaction gravitationnelle exercée par le Soleil sur la Terre.
- Exprimer la vitesse v et la période T de révolution de la Terre en fonction de r , de la constante de gravitation universelle K et de la masse M_S du Soleil.
- En déduire la masse M_S du Soleil. $(M_S = 2 \cdot 10^{30} \text{ kg})$

Exercice A11 : Masse de Saturne

La planète Saturne est entourée de nombreux anneaux et satellites. Voici quelques données relatives à cette planète et à ses satellites :

Satellites	Période de révolution	Rayon de l'orbite (milliers de km)
Saturne	29 y 167 d	1427 000
Janus	16 h 40 min	151,5
Mimas	22 h 37 min	185,8
Encelade	1 d 8 h 53 min	238,3
Téthys	1 d 21 h 18 min	294,9
Dioné	2 d 17 h 41 min	377,9

Les anneaux sont formés de divers éléments (cailloux, poussières et blocs de glace) non regroupés entre eux et tournant autour de Saturne. On considère que les astres sont ponctuels, que les trajectoires sont circulaires et que le mouvement est uniforme.

- Pour étudier le mouvement des satellites de Saturne, il convient de se placer dans un référentiel particulier que l'on peut appeler « saturnocentrique » par analogie à « géocentrique ». Comment définir le référentiel « saturnocentrique » ?
- À partir du bilan des forces exercées sur un satellite par Saturne (on néglige l'action des autres astres), établir la relation qui relie la vitesse v du satellite, le rayon r de son orbite, la masse M_s de Saturne et la constante K de gravitation universelle.
- Énoncer la troisième loi de Kepler. Déterminer à partir de celle-ci la masse de Saturne en utilisant les données relatives à l'un des satellites. (Pour Dioné : $M_{\text{Saturne}} = 5,71 \cdot 10^{26}$ kg)
- On néglige l'action des éléments les uns sur les autres devant l'action de l'astre sur chacun des éléments. A et B étant deux éléments de deux anneaux différents initialement alignés avec le centre de Saturne, cet alignement sera-t-il conservé ? Justifier la réponse.

Exercice A12 : Champs électrique et magnétique

Une particule chargée négativement de poids négligeable pénètre avec une vitesse v_0 dans différents champs uniformes qui peuvent être électrique ou magnétique.

Indiquez, selon le mouvement ultérieur de la particule, de quel type de champ il s'agit. Faites dans les quatre cas un croquis et représentez la trajectoire de la particule, la force qu'elle subit et le vecteur-champ en question. Motivez votre choix!

Dès qu'elle entre dans le champ

- la particule décrit un mouvement rectiligne uniforme,
- la particule décrit un mouvement rectiligne uniformément retardé,
- la particule décrit un mouvement circulaire uniforme,
- la particule décrit un mouvement parabolique.

Exercice A13 : Electron dans un champ magnétique

Un électron est envoyé avec une vitesse v_0 horizontale de norme $2 \cdot 10^7$ m/s dirigée vers la droite dans une région de l'espace où règne un champ magnétique uniforme \vec{B} de norme 10 mT, perpendiculaire au vecteur vitesse.

1. Faites une figure et précisez le sens de \vec{B} pour que l'électron soit dévié vers le bas.
2. Donnez les caractéristiques de la force \vec{F} qu'il subit et calculez sa norme. Comparez celle-ci à celle de son poids P .
($F = 3,20 \cdot 10^{-14}$ N $\approx 10^{15}$ P)
3. Calculez le rayon R de la trajectoire et de la durée nécessaire T pour parcourir un tour complet.
($R = 1,14$ cm ; $T = 3,57$ ns)
4. On double la vitesse initiale. Comment varient le rayon et la période ? Motivez ! ($R' = 2R$; $T' = T$)
5. Qu'est-ce qui change, lorsqu'on envoie la particule avec une vitesse initiale identique, mais parallèle au champ magnétique ? Motivez !

Exercice A14 : Le spectrographe de masse

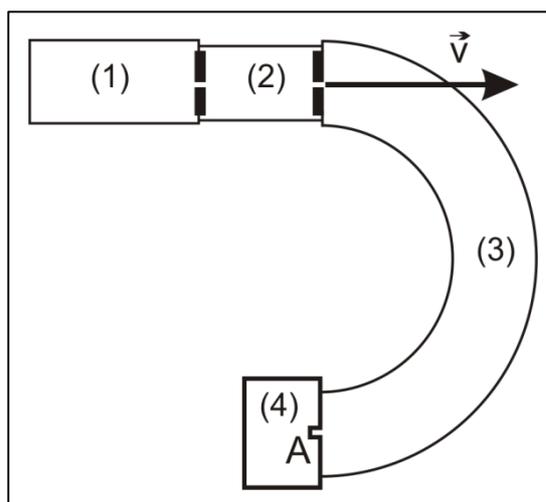
Voici le schéma d'un spectrographe de masse :

1. Précisez la nature des différents constituants de ce dispositif et rappelez son utilité.
2. Quelle est la nature du mouvement de particules chargées dans chacune des chambres?
3. Application:

Des ions $^{35}\text{Cl}^+$ sont accélérés sous une tension de 500 V. (On néglige le poids devant les autres forces qui interviennent).

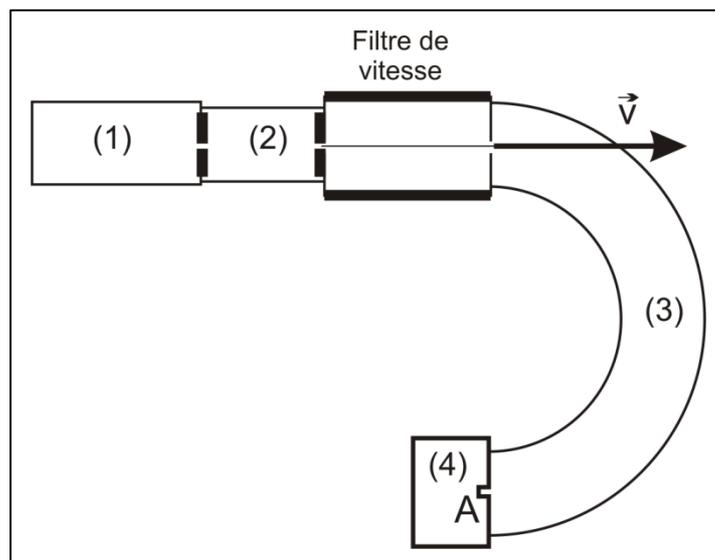
- a. Déterminez les caractéristiques (direction, sens, norme) du champ magnétique \vec{B} qui doit régner dans la cavité hémicylindrique pour que les ions viennent frapper le détecteur en A à 40 cm de l'endroit où ils pénètrent dans la chambre.
($B = 95,2$ mT)
- b. Etablissez une relation entre le rayon de la trajectoire des ions et la tension accélératrice. Déduisez-en à quelle distance d de A se trouve le lieu d'impact d'ions $^{37}\text{Cl}^+$ accélérés sous la même tension.
($d = 1,13$ cm)

On donne : masse d'un ion $^{35}\text{Cl}^+$: 34,968 u
 masse d'un ion $^{37}\text{Cl}^+$: 36,965 u



Exercice A15 : Filtre de vitesse

On intercale entre (2) et (3) du spectrographe de masse de l'exercice A14 un filtre (appelé filtre de vitesse ou filtre de Wien) tel que, pour un type d'ions donné, uniquement les particules ayant la même vitesse \vec{v} pénètrent dans la chambre (3). A l'intérieur du filtre règnent un champ magnétique \vec{B} et un champ électrique E dont les effets conjugués se compensent pour les particules ayant la vitesse \vec{v} (c.-à-d. que leur mouvement est rectiligne et uniforme à travers le filtre).



Sachant que l'intensité du champ magnétique

B est 150 mT, déterminez les caractéristiques (direction, sens et norme) du champ électrique E qu'il faut superposer à B pour que toutes les particules arrivent dans la chambre (3) avec la même vitesse de $5,25 \cdot 10^5$ m/s.

$$(E = 78,8 \text{ kV/m})$$

Exercice A16 : Particules α dans un champ magnétique

Des particules α pénètrent à la vitesse $v_0 = 10^3$ km/s horizontale dans une région de l'espace où règne un champ magnétique uniforme \vec{B} vertical vers le haut. On néglige leur poids !

1. Faites une figure soignée où vous indiquez \vec{v}_0 , \vec{B} et la force de Lorentz.
2. Déterminez les caractéristiques de \vec{B} pour que les particules α décrivent un demi-cercle de rayon 20 cm.
3. Avant de pénétrer dans le champ magnétique, les particules α initialement au repos ont été accélérées sous une tension U qu'on vous demande de déterminer.

$$(U = 10,4 \text{ kV})$$

Exercice A17 : Le cyclotron

1. Décrivez brièvement le principe de fonctionnement du cyclotron.
2. Un proton pénètre dans un dé du cyclotron avec une vitesse initiale de $2 \cdot 10^7$ m/s.
 - a. Déterminez les caractéristiques du champ magnétique qui doit régner dans les dés pour que le proton effectue un mouvement circulaire de rayon 2 m (au cours du premier demi-tour).
 - b. Quelle doit être la tension U régnant entre les dés, si on veut que le rayon du mouvement du proton soit augmenté de 5 % au bout du **premier demi-tour** (gardez 4 chiffres significatifs !). La tension entre les dés garde-t-elle toujours le même signe ? Expliquez !

$$(2a : B = 104 \text{ mT} ; 2b : U = 214 \text{ kV})$$

B. Oscillateurs, ondes et lumière**Oscillateurs mécaniques****Exercice B1 : Ressort de suspension**

Un ressort de suspension de voiture de raideur k et à spires non jointives est fixé avec une extrémité sur un banc d'essai. Un solide S, de masse m , fixé à l'autre extrémité du ressort peut glisser sans frottement sur une tige rigide horizontale $x'x$. L'abscisse du centre d'inertie G de S est repérée par rapport à la position O de G au repos. On écarte S de sa position d'équilibre et on le lâche, sans vitesse initiale, à l'instant $t = 0$. Son abscisse est alors $x = X_m$.

- Représenter schématiquement le système étudié.
- Faire le bilan des forces appliquées au solide S.
- Déterminer l'équation horaire du mouvement de S, sachant que $k = 4 \text{ kN/m}$, $m = 100 \text{ kg}$ et $X_m = 5 \text{ cm}$.
($x(t) = 0,05 \cdot \cos(6,32 \cdot t)$)
- Calculer la période propre pour les mêmes données numériques.
($T_0 = 0,993 \text{ s}$)

Exercice B2 : Pendule élastique

Un pendule élastique, constitué d'un solide de masse 200 g et d'un ressort de raideur 5 N/m, effectue des oscillations libres sur un banc à coussin d'air horizontal. L'axe des abscisses a la direction du ressort. L'origine des abscisses est la position du centre d'inertie G du solide lorsque celui-ci est au repos. L'origine des dates correspond au passage de G par l'origine des abscisses avec une vitesse de valeur 0,60 m/s dirigée dans le sens négatif de l'axe. Déterminer l'équation horaire qui décrit le mouvement de G et déterminer la date de son premier passage à l'abscisse $x = 3 \text{ cm}$.

$$(x(t) = 0,12 \cdot \cos(5t + \frac{\pi}{2}) ; t = 0,679 \text{ s})$$

Exercice B3 : Pendule élastique

Un pendule élastique horizontal est formé d'un ressort de raideur $k = 20 \text{ N/m}$ et d'une masse de 200 g ; à l'instant $t = 0$, le centre d'inertie est lancé à partir de la position $x = 2 \text{ cm}$ avec la vitesse initiale de 20 cm/s.

Calculer la valeur de l'énergie mécanique totale de l'oscillateur à l'instant du lancement et en déduire l'amplitude des oscillations ainsi que la vitesse de passage par la position d'équilibre.

$$(E_{\text{méc}} = 8 \text{ mJ} ; X_m = 2,83 \text{ cm} ; V_m = 28,3 \text{ cm/s})$$

Exercice B4 : Pendule élastique

Un solide de masse m pouvant glisser sans frottement sur un support horizontal est fixé à un ressort de raideur $k = 48 \text{ N/m}$. Son élongation x mesurée à partir de sa position d'équilibre est donnée par $x = X_M \cdot \sin(8 \cdot t - \pi)$. Pour faire osciller la masse m , on lui fournit une énergie de $0,24 \text{ J}$. Déterminer:

- La masse m du solide. ($m = 0,75 \text{ kg}$)
- L'amplitude du mouvement. ($X_m = 10 \text{ cm}$)
- La vitesse maximale de l'oscillateur. ($V_m = 80 \text{ cm/s}$)
- L'élongation de l'oscillateur pour laquelle l'énergie cinétique est égale à la moitié de l'énergie potentielle. ($x = \pm 8,16 \text{ cm}$)
- Les composantes de la vitesse et de l'accélération en ce point. ($v_x = \pm 0,46 \text{ m/s}$; $a_x = \pm 5,23 \text{ m/s}^2$)

Oscillateurs électriques

Exercice B5 : Oscillateur électrique

On considère le circuit électrique fermé comprenant un condensateur AB de capacité $C = 1 \mu\text{F}$ et une bobine d'inductance L et de résistance négligeable. La tension aux bornes du condensateur a pour expression :

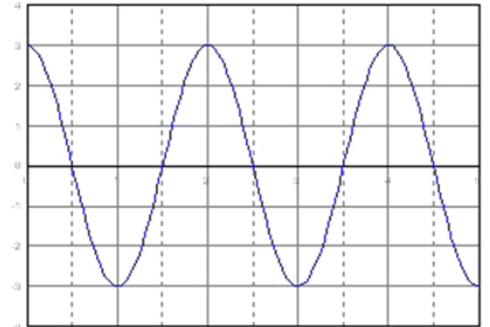
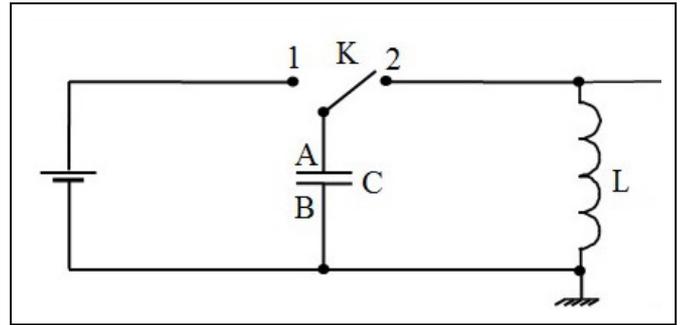
$$u_{AB} = 2 \cdot \cos(5000 \cdot t) \quad [u_{AB} \text{ en V}, t \text{ en s}]$$

- Calculer l'inductance L de la bobine. ($L = 0,04 \text{ H}$)
- Déterminer successivement les expressions de la charge $q(t)$ portée par l'armature A du condensateur et de l'intensité $i(t)$ du courant circulant dans le circuit. Indiquer le sens positif de i sur un schéma électrique. ($q_A(t) = 2 \cdot 10^{-6} \cdot \cos(5 \cdot 10^3 \cdot t)$)
- Démontrer que l'énergie électromagnétique emmagasinée dans ce circuit est constante. Calculer sa valeur numérique. En déduire la valeur de la tension u_{AB} au moment où l'intensité du courant vaut $i = 8 \text{ mA}$. ($E = 2 \cdot 10^{-6} \text{ J}$, $u_{AB} = \pm 1,2 \text{ V}$)
- Que deviennent ces oscillations, si la résistance de la bobine n'est pas négligeable ?

Exercice B6 : Interprétation d'un oscillogramme

Un circuit est constitué par un condensateur de capacité $C = 1,0 \mu\text{F}$ et une bobine d'inductance L et de résistance négligeable. Le condensateur est chargé sous une tension $U_{AB} = U_1$, l'interrupteur K étant en position 1. Il est ensuite relié à la bobine lorsque K est placé en position 2.

On étudie l'évolution, au cours du temps, de la tension instantanée $u_{AB} = u$ que l'on observe sur la voie Y de l'oscilloscope.



- Établir l'équation différentielle à laquelle obéit le circuit.
- Proposer une solution de l'équation différentielle précédente et la vérifier. Comment s'appelle ω_0 ? En déduire son expression.
- Déduire de l'oscillogramme, représenté ci-contre, la valeur numérique de l'inductance L de la bobine, ainsi que l'expression de la charge de l'armature A en fonction du temps. L'instant initial correspond au début de l'oscillogramme représenté, la sensibilité sur la voie Y est de 1 V/division et la base de temps est réglée à 0,5 ms/division.

$(L=0,101 \text{ H}, q_A(t) = 3 \cdot 10^{-6} C \cdot \cos(1000\pi t))$

Ondes progressives mécaniques

Exercice B7 : Onde progressive

A) L'équation du mouvement d'une source est de la forme $y(t) = Y_0 \sin(\omega \cdot t + \varphi)$. La période du mouvement est égale à 8 s. La trajectoire est un segment de droite de 12 cm de longueur. A l'origine des temps la source passe par sa position d'équilibre et se déplace vers le bas. Déterminer :

- les valeurs des trois paramètres Y_0 , ω et φ ; $(Y_0 = 6 \text{ cm} ; \omega = \pi/4 ; \varphi = \pi)$
- l'élongation y_s , la vitesse v_y et l'accélération a_y de la source après 1 s ; $(y = -4,24 \text{ cm} ; v_y = -3,33 \text{ cm/s} ; a_y = 2,62 \text{ cm/s}^2)$
- le temps au bout duquel la source se trouve pour la première fois à 3 cm au-dessus de la position d'équilibre. $(t = 4,67 \text{ s})$

B) On suppose que le mouvement vibratoire se propage sans amortissement dans le milieu environnant, la période dans l'espace (où longueur d'onde) étant égale à 320 cm. Calculer :

- la célérité c dans le milieu considéré ; $(c = 0,4 \text{ m/s})$
- l'élongation y_M , à l'instant $t = 6 \text{ s}$, d'un point M du milieu situé à 20 cm de la source. $(y_M = 5,54 \text{ cm})$

Exercice B8 :

L'extrémité S d'une corde est reliée à un vibreur harmonique transversal de fréquence $f = 50$ Hz et d'amplitude 2 cm. On suppose qu'il n'y a pas de réflexion à l'autre extrémité de la corde. Cette corde, de masse linéaire $\mu = 200$ g/m, est tendue par un poids de 20 N.

(On définit un axe S_x parallèle à la corde, orienté dans le sens de propagation des ondes et tel que $x_S = 0$.)

- Montrer que le point M d'abscisse $x_M = 1,2$ m est en phase avec la source S. Trouver un point de la corde qui est en opposition de phase avec M et S.
- L'origine des temps correspond à un passage de la source S par sa position d'élongation maximale. Déterminer l'équation d'onde.

$$(y_S(x;t) = 0,02 \cdot \sin[2\pi(t/0,02 - x/0,2) + \pi/2])$$

- Déterminer l'élongation y_M du point M ainsi que la vitesse de déplacement v_{My} du point M à l'instant $t = 0,012$ s.

$$(y_M = -1,62 \text{ cm}, v_{My} = 3,69 \text{ m/s})$$

Exercice B9 : Ondes progressives dans une corde

Une corde tendue très longue est excitée à l'une de ses extrémités par un mouvement transversal d'amplitude $A = 10$ cm et d'équation :

$$y = A \cdot \sin\left(\frac{2\pi \cdot t}{T}\right)$$

- Etablir l'équation de l'onde progressive se propageant dans la corde. Expliquer ce qu'on entend par double périodicité de *ce phénomène*.
- En admettant que la corde ait une masse de 100 g pour 10 m de longueur, et qu'elle soit soumise à une tension $F = 15$ N, calculer la célérité c du phénomène de propagation ainsi que sa longueur d'onde λ sachant que la fréquence vaut 16 Hz.

$$(c = 38,7 \text{ m/s}; \lambda = 2,42 \text{ m})$$

- Ecrire l'équation du mouvement d'un point M distant de 5 m de la source. Calculer son élongation à l'instant $t = 2,5$ s.

$$(y_M(x;t) = y_M(5;t) = 0,1 \sin[2\pi(16t - 2,07)];$$

$$y_M(5;2,5) = -4,01 \cdot 10^{-2} \text{ m}, \text{ calcul avec valeurs non-arrondies})$$

- A quelle distance se trouvent 2 points voisins vibrant en opposition de phase. Cette distance dépend-elle de la tension F ?

$$(\Delta x = \lambda/2 = \frac{1}{2f} \sqrt{\frac{F}{\mu}} = 1,21 \text{ m et dépend de } F)$$

- Comment faut-il varier F pour doubler la longueur d'onde? ($F' = 4F = 60$ N)

Ondes stationnaires

Exercice B10 : Corde tendue

Par quelle force faut-il tendre une corde de longueur 0,5 m et de masse 0,8 g pour que le son fondamental émis soit le la de fréquence 220 Hz?

Quelles sont les fréquences des deux premiers harmoniques après le son fondamental émis par cette corde dans les mêmes conditions?

$$(F = 77,44 \text{ N} ; f' = 440 \text{ Hz} ; f'' = 660 \text{ Hz})$$

Exercice B11 : Corde de guitare

La corde ré d'une guitare a pour fréquence fondamentale 293,7 Hz; la corde sol voisine vibre à 392 Hz. La longueur des parties vibrantes des deux cordes est 65 cm. On souhaite raccourcir la partie vibrante de l'une des deux cordes de manière qu'elle sonne à la même fréquence que l'autre.

- Quelle corde faut-il raccourcir? Motiver la réponse! (raccourcir la corde ré)
- De combien faut-il la raccourcir? ($\Delta l = 16,3 \text{ cm}$)
- Quelle est la longueur d'onde de la vibration sonore produite alors par les deux cordes? (La célérité du son dans l'air est 340 m/s.) ($\lambda = 86,7 \text{ cm}$)

Exercice B12 : Superposition de deux ondes progressives

Les équations d'onde de deux ondes voyageant en sens contraire sur une corde sont

$$y_1(x, t) = 0,03 \cdot \sin[\pi(10t + 2x)] \text{ et } y_2(x, t) = 0,03 \cdot \sin[\pi(10t - 2x)]$$

(toutes les grandeurs sont indiquées en unités SI)

- Déterminer la longueur d'onde et la période. ($\lambda = 1,0 \text{ m} ; T = 0,2 \text{ s}$)
- Ecrire l'équation d'onde de l'onde stationnaire qui résulte de la superposition des deux ondes. ($y_M(x, t) = 0,06 \cdot \cos(2\pi x) \cdot \sin[10\pi t]$)
- Trouver la position des deux nœuds les plus près de $x = 0$ (pour $x > 0$). ($x = 1/4 \text{ m}$ et $3/4 \text{ m}$)
- Trouver la position des deux ventres les plus près de $x = 0$ (pour $x > 0$). ($x = 1/2 \text{ m}$ et 1 m)
- Trouver l'amplitude A à $x = \lambda/8$. ($A = 3\sqrt{2} \text{ cm}$)

Exercice B13 :

Un vibreur S_1 est animé d'un mouvement oscillatoire sinusoïdal vertical de fréquence 30 Hz et d'amplitude 2 cm. A la date $t = 0$, il passe par sa position la plus basse.

- a) Déterminer l'équation horaire de S_1 dans un repère Oy orienté vers le haut.

$$(y_{S1}(t) = 0,02 \cdot \sin(60\pi t - \pi/2))$$

- b) S_1 est relié à une corde élastique horizontale de longueur 56 cm sur laquelle prend naissance une onde qui progresse à la célérité de 2,4 m/s. Déterminer l'équation du mouvement d'un point M situé à la distance de $x = 20$ cm de S_1 . Comparer l'état vibratoire de S_1 et de M.

$$(y_{M1}(0,2;t) = 0,02 \cdot \sin(60\pi t - 11\pi/2), S_1 \text{ et M en opposition de phase})$$

- c) A l'autre extrémité de la corde se trouve un deuxième vibreur S_2 , identique à S_1 mais qui passe par sa position la plus haute à la date $t = 0$. Écrire l'équation horaire de S_2 .

$$(y_{S2}(t) = 0,02 \cdot \sin(60\pi t + \pi/2))$$

- d) Comment peut-on qualifier les 2 sources S_1 et S_2 ? Peuvent-elles donner naissance à un phénomène d'interférences?

$$(S_1 \text{ et } S_2 \text{ en opposition de phase donc cohérentes})$$

- e) Écrire l'équation horaire du mouvement du même point M qu'en b) sous l'effet de l'onde progressive issue de S_2 . Comparer l'état vibratoire de S_2 et de M.

$$(y_{M2}(0,2;t) = 0,02 \cdot \sin(60\pi t - 17\pi/2), S_2 \text{ et M en opposition de phase})$$

- f) Quel est l'état vibratoire du point M sous l'effet des ondes issues de S_1 et S_2 ensemble?

$$(y_M(0,2;t) = 0 \Rightarrow M \text{ est un nœud})$$

Interférences lumineuses**Exercice B14 :**

Une expérience d'interférences en lumière verte conduit aux résultats de mesure suivants:

- distance séparant les centres de 11 franges brillantes consécutives: 10,0 mm
- distance entre les fentes: 1,5 mm
- distance entre le plan des fentes et l'écran: 2,80 m

Calculer la longueur d'onde et la fréquence de la lumière verte.

($\lambda = 535,7 \text{ nm}$)

Exercice B15 :

Deux fentes de Young sont séparées de 0,5 mm. Elles se trouvent à une distance $D = 3 \text{ m}$ d'un écran placé perpendiculairement à la médiatrice des 2 fentes. Calculer l'interfrange correspondant à la lumière rouge ($\lambda = 700 \text{ nm}$) respectivement à la lumière violette ($\lambda = 480 \text{ nm}$). En déduire une caractéristique des franges brillantes obtenues en lumière blanche.

($i_r = 4,2 \text{ mm}$ et $i_v = 2,9 \text{ mm}$, franges blanches avec bords colorés : bleu du côté de la frange centrale, rouge de l'autre côté)

Exercice B16 :

Un pinceau de lumière monochromatique émis par un laser hélium-néon éclaire deux fentes parallèles séparées par une distance $a = 0,5 \text{ mm}$. Un écran est placé perpendiculairement au pinceau lumineux à une distance $D = 2 \text{ m}$ du plan des fentes.

- Dessiner le dispositif expérimental.
- Interpréter la formation des franges brillantes et obscures.
- Définir la différence de marche aux 2 fentes d'un point M de l'écran et établir sa relation pour en déduire la position des centres des franges brillantes et obscures.
- Préciser la nature de la frange centrale appartenant au plan médiateur des 2 fentes.
- Définir l'interfrange. Quelle est l'influence des différents paramètres sur l'interfrange? Comment doit-on modifier la distance entre les 2 fentes pour obtenir des franges plus espacées ?
- Calculer la longueur d'onde et la fréquence de la lumière émise par le laser, sachant que les centres de 6 franges consécutives de même nature sont espacés de 12,7 mm.

($\lambda = 635 \text{ nm}$, $f = 472 \text{ THz}$)

- Est-ce que la longueur d'onde ou la fréquence change (ou les deux), si le rayon lumineux se propage dans le verre? Calculer les nouvelles valeurs. (Dans le verre la célérité de la lumière vaut $200\,000 \text{ km/s}$.)

($f = 472 \text{ THz}$, $\lambda = 424 \text{ nm}$)

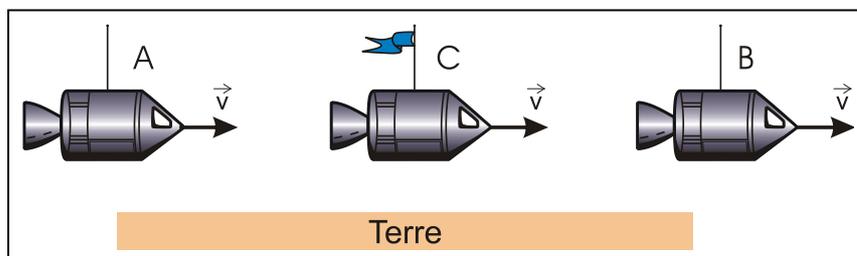
C. Physique moderne

Relativité restreinte d'Einstein

Petites questions de compréhension

- C1 Énoncez les deux postulats de la relativité restreinte.
- C2 Soit un muon traversant l'atmosphère terrestre. La durée propre de son parcours et la longueur au repos de la couche atmosphérique traversée sont-elles mesurées dans le même référentiel. Justifier votre réponse.
- C3 Pourquoi les effets de la dilatation du temps ne sont-ils pas aisément observables dans la vie de tous les jours?
- C4 Faisons "l'expérience par la pensée" suivante:

Trois astronautes se déplacent à travers l'espace, d'un mouvement rectiligne et uniforme par rapport à la Terre, au moyen des vaisseaux spatiaux A, C et B. Les



vaisseaux se suivent à des distances rigoureusement égales. C porte le commandement pour l'ensemble de la flotte. Un ordre est transmis aux vaisseaux A et B au moyen d'ondes électromagnétiques se propageant à la vitesse c .

Trouver un référentiel où :

- l'arrivée du signal en A et en B est simultanée ;
 - A reçoit le signal avant B ;
 - B reçoit le signal avant A.
- C5 Deux événements se produisent au même point mais à des instants différents dans un référentiel d'inertie. Ces deux événements peuvent-ils être simultanés dans un autre référentiel en mouvement rectiligne uniforme par rapport au premier?
- C6 Vous entendez vos amis dire que, selon la théorie de la relativité d'Einstein, "tout est relatif". Pour les convaincre du contraire, faites une liste de grandeurs, qui selon la relativité restreinte, sont (a) relatives, c'est-à-dire ont une valeur qui dépend du référentiel; (b) invariantes, c'est-à-dire ont la même valeur dans tous les référentiels d'inertie.
- C7 Pourquoi n'est-il pas possible pour un électron ou un proton de voyager à la vitesse de la lumière?
- C8 A quelle condition, l'équation $p = E/c$ est-elle valable pour un électron ou un proton?

Exercice C1 : Durée de passage d'un train

Un train de 100 m de longueur au repos mesure 80 m lorsqu'il est en mouvement.

Quelle est sa vitesse?

$$(v = 0,6c)$$

Quel temps met-il pour passer devant un arbre

a) dans le référentiel lié au sol;

$$(\Delta t_{\text{propre}} = 4,44 \cdot 10^{-7} \text{ s})$$

b) dans le référentiel du train?

$$(\Delta t_{\text{impropre}} = 5,56 \cdot 10^{-7} \text{ s})$$

Exercice C2 : Retard d'une horloge en mouvement

A quelle vitesse par rapport à la Terre doit-on déplacer une horloge pour que sa cadence mesurée dans le référentiel terrestre corresponde à 50 % de sa cadence mesurée dans le référentiel où elle est au repos ? (Indication : la cadence équivaut au nombre de « tic-tacs » par seconde, c.-à-d. à une fréquence)

$$(v = 0,866c)$$

Exercice C3 : Electron en mouvement rapide

Un électron se déplace à $0,998c$.

Trouvez son énergie cinétique et sa quantité de mouvement.

$$(E_c = 7,57 \text{ MeV}; p = 4,31 \cdot 10^{-21} \text{ kg m/s})$$

Exercice C4 : Energie acquise par un électron

Calculez l'énergie nécessaire pour accélérer un électron de

a) $0,6c$ à $0,8c$;

$$(E = 0,213 \text{ MeV})$$

b) $0,995c$ à $0,998c$?

$$(E = 2,97 \text{ MeV})$$

Exercice C5 : Diminution de la masse du Soleil

La puissance rayonnée par le Soleil correspond à $3,9 \cdot 10^{26} \text{ W}$. Sa masse est de $2 \cdot 10^{30} \text{ kg}$.

De combien sa masse décroît-elle en une seconde?

$$(\Delta m = 4,33 \cdot 10^9 \text{ kg})$$

Exercice C6 : Vitesse acquise dans un champ électrique

a) En physique classique, quelle est la différence de potentiel nécessaire pour accélérer un électron jusqu'à $0,9c$ à partir du repos?

$$(U = 2,07 \cdot 10^5 \text{ V})$$

b) Avec la différence de potentiel calculée en a) et si on tient compte des effets relativistes, quelle vitesse atteindrait l'électron?

$$(v = 0,703c)$$

Exercice C7 : Dilatation du temps et contraction des longueurs

Un électron ayant une énergie totale de 10 GeV parcourt 3,2 km le long du tube dans un accélérateur.

- a) Déterminez la longueur du tube dans le référentiel de l'électron? ($L_{\text{mouv}} = 0,1635 \text{ m}$)
- b) Combien de temps lui faut-il pour parcourir la distance calculée en a)
1. dans son référentiel ? ($\Delta t_{\text{propre}} = 5,45 \cdot 10^{-10} \text{ s}$)
 2. dans un référentiel lié au tube ? ($\Delta t_{\text{impropre}} = 1,07 \cdot 10^{-5} \text{ s}$)

Dualité Onde-Corpuscule

Exercice C8 : Effet photoélectrique

Le travail d'extraction d'un électron du zinc est égal à 3,3 eV.

- a) Calculer la fréquence seuil f_S et la longueur d'onde seuil λ_S du zinc. ($f_S = 7,98 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$; $\lambda_S = 376 \text{ nm}$)
- b) On éclaire le zinc par une radiation UV de longueur d'onde $0,25 \mu\text{m}$. Déterminer l'énergie cinétique maximale de sortie E_c des électrons et leur vitesse v . ($E_c = 1,66 \text{ eV}$; $v = 0,0025c$)
- c) On éclaire le zinc par la lumière d'un arc électrique en interposant une plaque de verre qui absorbe les ondes de longueur d'onde inférieure à $0,42 \mu\text{m}$. Un effet photoélectrique est-il observé ? Motiver !

Exercice C9 : Longueur d'onde associée à une particule

- a) Un ballon de football de masse $m = 500 \text{ g}$ se déplace avec une vitesse de $v = 54 \text{ km/h}$. Déterminer la longueur d'onde λ associée à ce ballon et en conclure qu'il est impossible de diffracter des corps macroscopiques. ($\lambda = 8,83 \cdot 10^{-35} \text{ m}$)
- b) Un électron possède une énergie 1 GeV. Déterminer la longueur d'onde λ associée à cet électron. Peut-il être diffracté ? Justifier la réponse ! ($\lambda = 1,24 \cdot 10^{-15} \text{ m}$)

Exercice C10 : Laser

Un laser à rubis (cristal de Al_2O_3 au traces d'ions Cr^{3+}) émet des impulsions lumineuses de longueur d'onde $694,3 \text{ nm}$ (lumière rouge). Une impulsion lumineuse a une puissance moyenne de 10 MW et une durée de 1,5 ns.

- a) Combien de photons sont émis pendant une impulsion ? ($N = 5,24 \cdot 10^{16}$)
Déterminez la quantité de mouvement de l'ensemble de tous les photons. ($p = 5,00 \cdot 10^{-11} \text{ kg m/s}$)
- b) Quelle est la vitesse de recul du laser à rubis, sachant qu'il a une masse de 140 kg ? ($v = 3,57 \cdot 10^{-13} \text{ m/s}$)

Physique nucléaire**Exercice C11 : Désintégration du polonium 218**

Dans la famille radioactive de l'uranium, on rencontre l'élément ^{218}Po qui par deux désintégrations successives, la première de type α , la seconde du type β^- , devient un isotope de bismuth.

1. Écrire les équations traduisant les deux désintégrations.
2. On observe que la deuxième désintégration s'accompagne d'une autre émission dangereuse pour l'organisme humain. Préciser de quelle émission il s'agit et indiquer brièvement sa cause.

Exercice C12 : Désintégration du carbone 14

Le carbone 14, émetteur β^- , de demi-vie 5730 ans, apparaît dans la haute atmosphère à la suite du choc de neutrons sur les atomes d'azote ^{14}N .

1. Écrire le bilan de la réaction de la formation de carbone 14.

Les plantes assimilent le dioxyde de carbone provenant de carbone 14 ou de carbone 12. La proportion des deux isotopes est la même dans l'atmosphère et dans les végétaux. Quand une plante meurt, le processus d'assimilation s'arrête et la teneur en carbone 14 diminue. Pour connaître l'époque à laquelle vécurent les humains préhistoriques dans la caverne de Lascaux, on mesure la radioactivité d'un échantillon de charbon de bois enfoui dans le sol de la grotte. Le nombre de désintégration n'est plus que 1,6 par minute alors qu'il serait 11,5 par minute pour un échantillon de charbon de bois « actuel » de même masse.

2. Combien de temps s'est-il écoulé, depuis le dernier feu, dans la grotte de Lascaux ?

$$(T_{1/2} = 16\,305\text{y})$$

Exercice C13 : Réaction de fission

Parmi les diverses réactions de fission possibles pour le noyau de l'atome de l'uranium $^{235}_{92}\text{U}$ lorsqu'il absorbe un neutron, l'une donne naissance au noyau ^{139}Xe , au noyau ^{95}Sr ainsi qu'à deux neutrons. Les énergies de liaison par nucléon des trois noyaux sont respectivement : 7,7 MeV pour l'uranium ; 8,4 MeV pour le xénon et 8,7 MeV pour le strontium.

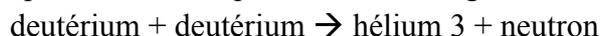
1. Montrer que cette réaction est exoénergétique et calculer l'énergie libérée par la fission d'un noyau d'uranium 235.
2. Calculer l'énergie libérée par la fission totale d'un kilogramme d'uranium 235.

$$(E = 4,73 \cdot 10^{26} \text{ MeV} = 75,8 \text{ TJ})$$

3. Après plusieurs désintégrations de type β^- , les produits primaires de fission aboutissent respectivement à deux nucléides stables : le lanthane (La) et le molybdène (Mo). Écrire le bilan global de ces désintégrations en précisant le nombre de masse pour chaque nucléide stable, ainsi que l'équation bilan de la fission du noyau ^{235}U conduisant aux nucléides stables. Observe-t-on, au cours de ces désintégrations, une émission de rayonnement γ ?

Exercice C14 : Réaction de fusion

Une des réactions de fusion possible afin de produire de l'énergie est :



avec la réaction ultérieure de deutérium sur l'hélium 3 pour former de l'hélium 4.

1. Écrire les équations bilan des deux réactions ainsi que le bilan de l'ensemble de la fusion.
2. Montrer que les deux réactions sont exoénergétiques et calculer la libération d'énergie pour la fusion de 1 kg de deutérium.

On donne les masses des noyaux suivantes :

hydrogène : 1,007 276 u ; deutérium : 2,013 451 u ; hélium 3 : 3,014 933 u ;

hélium 4 : 4,001 502 u ; neutron : 1,008 655 u.

$$(E = 2,14 \cdot 10^{27} \text{ MeV} = 343 \text{ TJ})$$

(enthalpies de combustions : essence : 47,3 MJ/kg ; dihydrogène : 142 MJ/kg)

Exercice C15 : Désintégration du polonium 210

Le polonium 210, noyau instable, subit une désintégration α en donnant un noyau de plomb dans son état fondamental.

1. Écrire l'équation bilan de la désintégration en précisant les nombres en précisant les nombres de masse et de charge.
2. Calculer l'énergie libérée lors de la désintégration d'un noyau de polonium en utilisant les données suivantes : $(E = 5,03 \text{ MeV})$

Noyau	Masse (en unités de masse atomique)
Po	209,914 6
Pb	205,907 7
He	4,001 5

3. Que signifie l'affirmation « la demi-vie du nucléide polonium 210 est de 138 jours » ?
4. Calculer la masse de polonium 210 restant au bout de 414 jours dans un échantillon qui en contenait initialement 20g. $(m = 2,5\text{g})$

Exercice C16 : Désintégration du radium 226

Un noyau de radium 226 se désintègre en un noyau de radon.

1. Écrire la réaction nucléaire correspondante.

2. Connaissant les masses des noyaux de

radium 226 :	225,953 2 u,
radon 222 :	221,946 9 u,
hélium 4 :	4,001 5 u,

calculer l'énergie libérée lors de la désintégration d'un noyau de radium. (E = 4.47 MeV)

3. En admettant que cette énergie est entièrement acquise par la particule α sous forme d'énergie cinétique, déterminer, en appliquant les lois de la mécanique classique, la vitesse d'émission de la particule α . La valeur trouvée justifie-t-elle l'application de la mécanique classique si on admet qu'il faut recourir à la mécanique relativiste si la vitesse d'une particule est supérieure à 10% de la vitesse de la lumière?

$$(v = 1,47 \cdot 10^7 \text{ m/s} = 4,9 \% \text{ de } c < c/10 \rightarrow \text{particule classique})$$

Etats énergétiques quantifiés

Exercice C17 : Le spectre de l'hydrogène

L'énergie de l'atome d'hydrogène est donnée par $E_n = \frac{E_1}{n^2}$, avec $E_1 = -13,6 \text{ eV}$.

a) Expliquez la signification des symboles E_1 et n .

b) Vrai ou faux ? Justifiez votre réponse !

1. L'énergie du 2^e niveau excité est $-2,42 \cdot 10^{-19} \text{ J}$. (vrai)

2. L'atome d'hydrogène peut avoir une énergie égale à $-2,8 \text{ eV}$. (faux)

3. Le spectre d'émission de l'hydrogène est continu. (faux)

4. Le niveau d'énergie 0 eV correspond à l'atome d'hydrogène dans son état fondamental, non excité. (faux)

5. L'atome d'hydrogène peut émettre une radiation de longueur d'onde 103 nm en passant du niveau $n = 3$ au niveau $n = 1$ (vrai)

c) Un atome d'hydrogène passe du niveau $n = 3$ à un niveau supérieur $n > 3$ en absorbant une radiation de longueur d'onde 1282 nm.

A quelle partie du spectre électromagnétique appartient cette radiation ? (IR)

Calculez le nombre n du niveau supérieur. (n = 5)

Exercice C18 : Atome d'hydrogène

1. Calculer les énergies des 3 premiers états excités ($n > 1$) de l'atome d'hydrogène ainsi que E_∞ .
2. Dans quel état se trouve l'atome si $n \rightarrow \infty$?
3. Montrer que l'énergie du photon émis ou absorbé par un atome d'hydrogène lors d'une transition électronique se calcule de la façon suivante :

$$E = h\nu = |E_1| \cdot \left| \frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right|$$

4. Dessiner le diagramme énergétique de l'atome d'hydrogène (échelle : 1 eV $\hat{=}$ 1 cm).
5. Représenter par des flèches quelques transitions électroniques aboutissant sur la couche K (série de Lyman), sur la couche L (série Balmer) et sur la couche M (série Paschen).
6. Quelle série se trouve dans le domaine de l'UV et quelle série se trouve dans l'IR sachant que celle de Balmer se trouve partiellement dans le domaine visible du spectre de la lumière ? Justifier sans calcul numérique.
7. Calculer la longueur d'onde du photon correspondant respectivement à la transition :

$$n = 2 \rightarrow n = 1, n = 4 \rightarrow n = 1 \text{ et } n = 3 \rightarrow n = 2$$

Exercice C19 : Ionisation de l'atome d'H

Quelle doit être la longueur d'onde maximale d'un photon capable d'ioniser un atome H dont l'électron se trouve sur la couche M ?

$$(\lambda_{\max} = 821 \text{ nm})$$

Exercice C20 :

Supposons qu'un proton, accéléré à partir du repos par une tension $U = 24 \text{ V}$, cède 25 % de son énergie cinétique à un atome d'hydrogène.

- a) Peut-il ioniser l'atome H se trouvant dans l'état fondamental ?
- b) Peut-il ioniser l'atome H se trouvant dans le premier état excité ?
- c) Peut-il assurer la transition d'un électron de la couche K vers la couche L ?

Justifier les réponses.

$$(\Delta E = 6 \text{ eV ; non ; oui ; non})$$

Exercice C21 :

Le 24 janvier 2009, un laboratoire de physique nucléaire a reçue une source radioactive de cobalt 60, émetteur β^- ayant une activité à cette date de 50,19 MBq. La demi-vie de cet isotope du cobalt est de 5,271 années. Le noyau fils est émis dans un état excité.

- Écrire les équations des transformations nucléaires.
- Calculer la masse du cobalt contenue dans la source à la date de l'achat. La masse d'un atome de cobalt est 59,93 u.
- Calculer l'activité de la source le 24 janvier 2016.
- Sans calculer, donner la date à laquelle l'activité n'est plus que 12,5% de l'activité initiale.
- La figure ci-contre montre le diagramme énergétique du noyau fils. Calculer les longueurs d'onde du rayonnement émis lors des transitions successives de l'état excité d vers l'état b et de l'état b vers l'état fondamental a.

