



SESSION 2021

CLASSES DE TERMINALE

SCIENCE S P H Y S I Q U E S

THEME : LES INTERACTIONS FONDAMENTALES

Données

Unité de masse atomique : $1u = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 931,5 \text{ MeV}/c^2$	Constante de Planck	$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$
Masse de l'électron : $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg} = 0,00055 \text{ u}$	Intensité de la pesanteur au sol: $g = 9,81 \text{ m.s}^{-2}$	
Masse du neutron : $m_n = 1,00866 \text{ u}$	Masse de la Terre : $M_T = 5,98 \cdot 10^{24} \text{ kg}$	
Masse du proton : $m_p = 1,00728 \text{ u}$	Rayon de la Terre $R_T = 6370 \text{ km}$	
Charge élémentaire : $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$	Constante de gravitation $K = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ SI}$	
Permittivité du vide $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ SI}$	Célérité de la lumière dans le vide : $C = 3 \cdot 10^8 \text{ m}$	

TEXTE INTRODUCTIF

Tout ce qu'on connaît de l'univers peut être décrit, en principe, avec quatre interactions de base, en cours d'unification. Ce qu'un physicien entend par « interaction », c'est le fait que, lorsque deux objets sont présents, ils exercent l'un sur l'autre une influence qui modifie son comportement à ce qu'il serait si chacun d'eux était le seul. Autrement dit : lorsque deux objets sont en présence, il apparaît de l'un sur l'autre et réciproquement une force d'interaction qui change leur état de mouvement et éventuellement de forme. Dans le cadre de la physique des particules élémentaires, on utilise couramment le mot interaction de préférence au mot force. On distingue quatre types d'interactions (ou de forces) fondamentales :

- 1- Interaction gravitationnelle : c'est une interaction qui intervient de façon essentielle dans les systèmes de masse élevée dont elle règle la forme et le mouvement. Les galaxies lui sont soumises dans les amas des galaxies. Il en est de même des étoiles, les planètes et les stellites naturels ou artificiels. C'est elle également qui est responsable de la pesanteur au voisinage de la terre.
- 2- A notre échelle, c'est l'interaction électromagnétique qui joue un rôle clé. Toutes ses caractéristiques sont résumées dans la théorie dite Maxwell qui unifie des phénomènes aussi différents que l'électrostatique, le magnétisme, les ondes radio, la lumière, et les rayonnements X et gamma.
- 3- Interaction forte : ce sont les interactions fortes qui sont responsables de la cohésion des noyaux atomiques. En effet les noyaux des atomes est un empilement de neutrons et de protons particules chargées positivement. Ces particules peuvent se repousser et quitter le noyau, cependant ce fait n'est pas observé. C'est qu'il faut évoquer une nouvelle interaction suffisamment attractive entre les protons pour compenser largement leur répulsion coulombienne. En fait, on s'aperçut que cette interaction agit de façon semblable entre deux nucléons qu'ils soient neutres ou chargés. Elle a été découverte en dernier ; ceci tient à sa courte portée, de l'ordre de $1,5 \cdot 10^{-15} \text{ m}$
- 4- Interaction faible : pendant que les physiciens étudiaient l'interaction forte, ils découvrirent aussi une quatrième interaction nécessaire pour décrire la radioactivité β . Les noyaux qui la subissent se désintègrent en émettant un électron accompagné d'une autre particule, l'antineutrino.

Si l'intensité de l'interaction forte est désignée par 1, nous pouvons calculer les nombres comparatifs correspondants pour les différentes interactions, et nous avons : Interaction forte 1 ; Interaction électromagnétique 10^{-2} ; Interaction faible 10^{-14} et Interaction gravitationnelle 10^{-39}

On ne connaît pas précisément encore la portée de l'interaction faible ; on sait seulement qu'elle est inférieure à 10^{-17} m .
 Pourtant, l'étude des interactions forte et faibles est déjà bien avancée. Au début on pensait que le proton, le neutron, l'électron, le photon et le neutrino représentaient toutes les particules fondamentales. Depuis lors, on a observé plus de 300 particules, toutes différentes, dont la liste s'allonge sans cesse. Fort heureusement, on a pu les classer en famille dans des tableaux « à la Mendeleïev ». Puis, les régularités ainsi manifestées ont suggéré l'existence des constituants élémentaires : les fameux quarks.

Enfin, des Newtons s'annoncent qui s'emblent en mesure d'unifier les quatre interactions dans quelque temps. Ce problème ouvert s'inscrit en effet dans la démarche théorique, chère à Newton, qui consiste en une recherche obsessionnelle de l'unité.

Questions sur le texte

- 1-Citer les quatre type d'interaction fondamentale
- 2- Indiquer le type d'interaction responsable de la pesanteur terrestre
- 3-Dans quelle théorie sont résumées toutes les caractéristique de l'interaction électromagnétique.
- 4-Donner les caractéristiques de l'interaction forte qui se manifeste dans les noyaux
- 5- Donner la démarche chère à Newton à propos de interactions fondamentales.

Partie A : Questions sur le texte (05 points)

Lire attentivement le texte et réponde aux questions suivantes :

A-1- Citer les quatre types d'interaction fondamentale.

A-2- Préciser le type d'interaction dominant à l'échelle :

- planétaire,
- subatomique

A-3-Qu'est ce qui différencie fondamentalement l'interaction nucléaire faible de l'interaction nucléaire forte ?

A-4-Expliquer la cohésion du noyau.

A-5- Dans quelle mesure peut-on affirmer que l'étude des interactions fortes et faibles a évolué ?

Partie B : Interaction gravitationnelle. (32 points)

L'interaction gravitationnelle intervient de façon essentielle dans les systèmes de masse élevée dont elle régle la forme et le mouvement. Les étoiles et les planètes lui sont soumises.

L'application de la deuxième loi de Newton permet de déterminer la trajectoire d'un objet soumis à une force.

Pour le cas de la force d'interaction entre deux masses, le problème est simple si les deux masses sont ponctuelles et si l'une des masses est considérée comme fixe.

B-1 Loi de la gravitation

La loi de gravitation universelle due à Newton a permis une interprétation des mouvements des planètes, des satellites et aussi des objets à la surface terrestre. Elle est à la base de tous les calculs relatifs aux mouvements des planètes et des satellites.

La loi s'énonce comme suit : Deux objets ponctuels A et B, de masse m_A et m_B , séparés par une distance r , exercent l'un sur l'autre respectivement des forces attractives \vec{f}_{AB} et \vec{f}_{BA} données par l'expression :

$$\vec{f}_{AB} = -\vec{f}_{BA} = K \frac{m_A m_B}{r^2} \vec{u}.$$

K est une constante universelle appelée constante de gravitation et \vec{u} un vecteur unitaire pris sur la droite joignant les deux objets : $\vec{u} = \frac{\vec{BA}}{\|\vec{BA}\|}$

Pour les systèmes à symétrie sphérique de masse, la force gravitationnelle exercée par le système est la même que celle exercée par un point matériel de masse égale à celle du système et placé en son centre.

B-1-1 Faire un schéma où seront représentés les points matériels A et B, le vecteur unitaire \vec{u} et les forces \vec{f}_{AB} et \vec{f}_{BA} .

B-1-2 Donner l'unité de la constante de gravitation K dans le système international.

B-1-3

B-1-3-1 On considère deux corps A et B à symétrie sphérique de masse respective 100 kg et 2 kg dont les centres sont distants de 1 m. Calculer l'intensité de la force de gravitation exercée par A sur B.

B-1-3-2 Calculer l'intensité de la force d'interaction entre la Terre et la Lune. Conclure.

Masse de la lune $M_L = 7,34 \cdot 10^{22}$ kg ; Masse de la terre $M_T = 5,98 \cdot 10^{24}$ kg ;
distance Terre-Lune $d = 3,84 \cdot 10^8$ m.

B-1-4 On considère que la force exercée par le point matériel A sur le point B peut s'écrire :

$$\vec{f}_{AB} = \vec{f} = m_B \vec{G} \quad \text{où } \vec{G} \text{ est le vecteur champ de gravitation créé par A au point où B est placé.}$$

B-1-4-1 Donner l'expression de \vec{G} .

B-1-4-2 Préciser les caractéristiques du vecteur champ de gravitation créé par la terre de masse M_T en un point situé à la distance r du centre de la terre.

B-2 Gravitation et pesanteur terrestres

B-2-1 On considère un objet supposé ponctuel, situé en un point M à la latitude λ sur la surface terrestre.

On désigne par R' un repère géocentrique (ayant pour origine le centre de la terre supposé sphérique)

En équilibre dans le repère terrestre ; le point M décrit dans R' un cercle de rayon ρ suivant un mouvement uniforme de vitesse angulaire ω égale à celle de la terre dans sa rotation autour d'elle-même (autour de l'axe des pôles).

B-2-1-1 Exprimer le rayon ρ de la trajectoire de M dans R' en fonction du rayon R_T de la terre et de λ

B-2-1-2 La force gravitationnelle exercée par terre sur le point M supposé au sol est $\vec{F}_G = m\vec{G}$, relation où \vec{G} est le vecteur de champ de gravitation terrestre au point M.

a) Reproduire la figure et représenter \vec{F}_G et \vec{G}

b) Donner l'expression de l'accélération centrale a_e en fonction de R_T , λ et ω et représenter sur la figure le vecteur \vec{a}_e

c) Représenter aussi sur la figure la pseudo-force centrifuge $\vec{\varphi} = -m\vec{a}_e$

B-2-1-3 L'équilibre du point M dans le repère terrestre implique

$m\vec{G} + \vec{\varphi} + \vec{R} = \vec{0}$; \vec{R} : réaction du sol sur le point M

a) Montrer que le poids de l'objet est alors $\vec{p} = m\vec{G} + \vec{\varphi}$

b) En prenant une échelle arbitraire représenter le vecteur \vec{p}

c) Donner l'expression du vecteur champ de pesanteur \vec{g} en fonction de \vec{G} et \vec{a}_e .

B-2-1-4 La valeur de G au niveau du sol est 9,80 S.I, la période de rotation de la terre autour de l'axe des pôles est 86164 s et le rayon de la terre est $R_T = 6370 \cdot 10^3$ m.

a) Calculer $g = \|\vec{g}\|$ en un lieu où $\lambda = 49^\circ$; à l'équateur $\lambda = 0^\circ$ et aux pôles $\lambda = \pm 90^\circ$

b) Comparer la valeur de g aux pôles à celle donnée expérimentalement qui est de 9,83 S.I ; donner une explication au petit écart existant entre ces deux valeurs.

B-2-2 Un dispositif d'arrosage situé au niveau du sol envoie un jet d'eau avec une vitesse initiale \vec{v}_0 , de module $v_0 = 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ et faisant un angle $\alpha = 30^\circ$ avec l'horizontale. Par une étude dynamique du mouvement d'une goutte d'eau de masse m qu'on supposera ponctuelle, répondre aux questions suivantes.

B-2-2-1 Etablir les équations horaires et l'équation de la trajectoire d'une goutte d'eau.

B-2-2-2 A quelle hauteur maximale h s'élève le jet d'eau ?

B-2-2-3 La portée D est la distance entre le point de départ et le point atteint par la goutte d'eau dans le même plan horizontal. Quelle est la portée de ce jet d'eau ?

B-2-2-4 La valeur de la vitesse initiale étant constante, de quel angle α doit-on incliner le dispositif pour arroser le plus loin possible ? Calculer la valeur de la portée dans ce cas.

B-2-3 Un corps est lancé depuis la surface de la Terre vers le haut avec une vitesse initiale v_0 . On néglige la résistance de l'air.

B-2-3-1 Donner l'expression de la vitesse du mobile à la hauteur H au-dessus de la surface terrestre.

B-2-3-2 Calculer la vitesse initiale minimale qu'il faut donner au mobile pour qu'il ne retombe jamais.

Données : $R_T = 6370 \text{ km}$ et on prendra $g = 9,8 \text{ S.I}$.

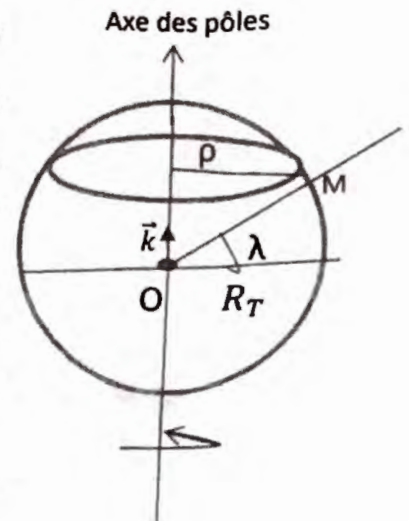
B-3. Mouvement d'un satellite de la terre

On considère un satellite de la terre. Le satellite est à l'altitude h et décrit une orbite circulaire de rayon r autour de la terre. La masse de la terre sera notée M_T et celle du satellite m.

B-3-1 Le satellite n'étant soumis qu'à la seule force de gravitation terrestre, montrer que son mouvement est uniforme.

B-3-2 Etablir en fonction de G, M_T et r, l'expression de la vitesse et celle de la période du satellite.

Faire l'application numérique avec les données suivantes : Masse de la terre $M_T = 5,98 \cdot 10^{24} \text{ kg}$, rayon de la Terre $R_T = 6370 \text{ km}$. Altitude du satellite : $h = 320 \text{ km}$.



Toutes séries réunies

B-3-3 Après avoir précisé le plan du mouvement d'un satellite géostationnaire, calculer son altitude. Quel est l'intérêt d'un satellite géostationnaire ?

B-3-4 La navette spatiale Coulombia a été placée sur une orbite circulaire à l'altitude de 250 km de la terre.

B-3-4-1 Calculer sa vitesse et sa période de révolution autour de la terre.

B-3-4-2 La navette spatiale Coulombia passait le 28 Novembre 1983 par dessus de deux villes A et B distantes de $d = 940$ km (la distance d est confondue à l'abscisse curviligne). Calculer l'intervalle de temps séparant les passages de Coulombia au dessus de ces deux villes (on néglige la rotation terrestre).

B-4. Mouvements des planètes

B-4-1 La force d'attraction gravitationnelle du soleil sur une planète est donnée par l'expression

$$\vec{f} = -K \frac{m_S m_P}{r^2} \vec{u}_r \text{ où } K : \text{constante gravitationnelle} = 6,673 \cdot 10^{-11} \text{N.m.kg}^{-1}; m_S : \text{masse du soleil};$$

m_P : masse de la planète ; r = distance entre le centre du soleil et le centre de la planète et \vec{u}_r : vecteur unitaire de sens Soleil-Planète.

B-4-1-1 Schématiser le système « Soleil-Planète » en y représentant la force agissant sur la planète.

B-4-1-2 Dans une première approximation on suppose que la trajectoire de la planète autour du soleil est circulaire. Montrer que le mouvement est uniforme et en déduire l'expression de la vitesse v et celle de la période T du mouvement d'une planète en fonction de K , m_S et r .

B-4-2 On considère le mouvement circulaire de la terre autour du soleil

B-4-2-1 La période de rotation de la terre autour du soleil est 365,25 jours. Evaluer la masse du soleil, sachant que la distance terre-soleil est $r = 150 \cdot 10^6$ km.

B-4-2-2 La terre en tournant autour du soleil tourne autour de l'axe de ses pôles. A partir de ces mouvements de la terre donner une explication de l'alternance des saisons et celle des jours et des nuits.

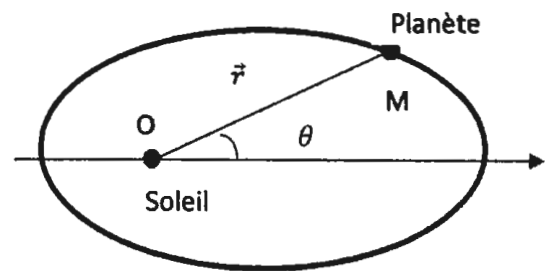
B-4-3 Les trajectoires de deux planètes sont deux cercles ayant comme centre le soleil supposé ponctuel, de rayons respectifs R et R' parcourus pendant des périodes respectives T et T' .

B-4-3-1 Démontrer la relation : $\left(\frac{T'}{T}\right)^2 = \left(\frac{R'}{R}\right)^3$

B-4-3-2 La distance du soleil à la planète Mars est environ $230 \cdot 10^6$ km. En déduire la durée de l'année martienne. Donnée : la distance terre-soleil est : $150 \cdot 10^6$ km.

B-4-4 En réalité les trajectoires des planètes autour du soleil sont des ellipses d'équation polaire :

$r(\theta) = \frac{p}{1+e\cos\theta}$, $\theta =$ angle que fait le rayon vecteur \vec{r} avec une position origine, p et e sont des constantes caractéristiques de l'ellipse. Le mouvement n'est plus uniforme. On pose $\vec{OM} = r \vec{u}_r$ et $r = f(\theta)$



La trajectoire d'une planète autour du soleil est une ellipse dont l'un des foyer est le centre O du soleil.

B-4-4-1 Montrer que la vitesse \vec{v} dans le référentiel héliocentrique peut s'écrire : $\vec{v} = \dot{r} \vec{u}_r + r \dot{\theta} \vec{u}_\theta$; \vec{u}_θ est un vecteur unitaire perpendiculaire à \vec{u}_r .

B-4-4-2 Donner l'expression de l'énergie mécanique totale du système soleil-planète. On prendra l'infini comme état de référence pour l'énergie potentielle.

B-4-4-3 En utilisant la loi de conservation de l'énergie mécanique totale, retrouver l'équation différentielle classique qui régit le mouvement d'une planète :

$$\frac{d^2 u}{d\theta^2} + u = K \frac{m_S m_P}{L_0^2} ; \text{ avec } L_0 = m_P r^2 \dot{\theta} \text{ et } u = \frac{1}{r}$$

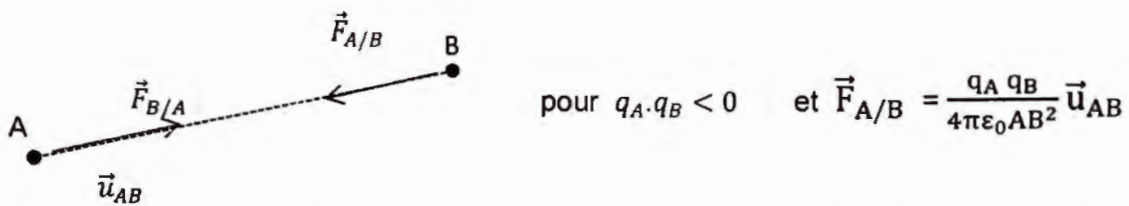
B-4-4-4 La solution générale de l'équation précédente est : $u = A \cos\theta + \frac{K m_S (m_P)^2}{L_0^2}$; retrouver les expressions de p et e données dans l'équation de l'ellipse en fonction de : L_0 , K , m_S , m_P et de la constante A .

Partie C : Interaction électromagnétique (40 points)

L'interaction électromagnétique est attractive entre particules de charges de signes contraires et répulsive entre particules de charges de même signe. Elle explique l'attraction des électrons par le noyau atomique. L'interaction électromagnétique est décrite par des émissions ou absorption des photons dans la théorie quantique des champs. Elle se traduit aussi par la force de Lorentz pour une particule de charge q et de vitesse \vec{v} placée dans un champ électromagnétique. La loi de Lorentz donnant la force agissant sur une particule placée dans un domaine où règnent à la fois un champ électrique \vec{E} et un champ magnétique \vec{B} créés par d'autres systèmes de charges est : $\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \wedge \vec{B})$

C-1 Interaction « charge électrique – charge électrique » – spectre d'émission

L'interaction électrique entre deux corps ponctuels A et B, portant des charges q_A et q_B est modélisée par des forces d'attraction ou de répulsion $\vec{F}_{A/B}$ et $\vec{F}_{B/A}$ opposées. On a représenté ci-dessous le cas de forces attractives ..



C-1-1 On considère un modèle d'atome composé d'un noyau ponctuel fixe de masse M , de charge positive $Z.e$, autour duquel gravitent Z électrons ; Z est le numéro atomique de l'élément.

On admet que le noyau est fixe, tandis que l'électron, de masse m et de charge $-e$, décrit une orbite circulaire de centre N (N : noyau de l'atome) et de rayon r .

C-1-1-1 Donner l'expression de la force d'interaction entre l'électron et le noyau en fonction de Z , e , ϵ_0 (permittivité du vide), r et \vec{u} vecteur unitaire dirigé de N vers l'électron.

C-1-1-2 Montrer que le mouvement de l'électron autour du noyau est uniforme

C-1-1-3 Exprimer l'énergie totale E du système noyau-électron dans le cadre de la mécanique classique en fonction de Z, e, r et de ϵ_0 : permittivité du vide. Donner une interprétation sur le signe de l'énergie. On prendra l'état de référence pour l'énergie potentielle pour $r \rightarrow \infty$.

C-1-2 Quand on fait passer une décharge électrique dans un tube contenant du dihydrogène sous faible pression ; on constate une émission de lumière. Le spectre d'émission de l'atome présente un grand nombre de raies dans l'ultraviolet, le visible et l'infrarouge.

Pour exprimer le spectre de raies, le physicien Bohr introduit la condition de quantification du moment cinétique de l'électron : $\sigma = mvr = n\hbar$ avec $\hbar = \frac{h}{2\pi}$; h : constante de Planck et n : un nombre entier $\neq 0$.

C-1-2-1 Montrer que les expressions des rayons des orbites décrites par l'électron sont de la forme :

$$r_n = n^2 \frac{h^2 \epsilon_0}{\pi m Z e^2}$$

C-1-2-2 Calculer la valeur de $r_1 = a_0$ pour $n = 1$, $Z = 1$ et $m = 9.10^{-31} \text{kg}$ (atome d'hydrogène)

$$h = 6,626.10^{-34} \text{J.s} \text{ et } \epsilon_0 = \frac{1}{36\pi.10^9}$$

C-1-3 En 1885 Balmer et Rydberg remarquent que le spectre d'émission dans le visible de l'atome d'hydrogène en longueur d'onde est telle que : $\frac{1}{\lambda_{n,2}} = R_y \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right)$. Lors de la retombée ou transition de l'électron du niveau $n > 2$ à $n = 2$, l'électron émet un rayonnement situé dans le visible ; l'ensemble des raies correspondant constitue la série de Balmer.

C-1-3-1 De l'expression de l'énergie du niveau n déterminer la valeur de la constante R_y

C-1-3-1 Calculer les longueurs d'onde en \AA du rayonnement émis correspondant aux transitions suivantes :

de $n = 3$ à $n = 2$ (raie H_α) ; de $n = 4$ à $n = 2$ (raie H_β) ; de $n = 5$ à $n = 2$ (raie H_γ) et de $n = 6$ à $n = 2$ (raie H_δ)

C-1-4 On étudie l'influence de l'entraînement du noyau sur le spectre d'émission.

Dans la théorie initiale de l'atome de Bohr, on admet que l'électron tourne autour du proton qui est fixe dans le référentiel du laboratoire. En réalité, il s'agit d'un problème à deux corps que l'on résout en considérant

que le noyau n'est pas fixe et en introduisant une particule fictive de masse réduite $\mu = \frac{mm'}{m+m'}$ où m est la

masse de l'électron et m' la masse du noyau soumis à une force d'attraction.

Une des raies du spectre de l'atome d'hydrogène a une longueur d'onde $\lambda = 486,132 \text{ nm}$. En 1932, H. Urey découvrit que cette raie avait une très proche voisine, de très faible intensité, et de longueur d'onde $\lambda' = 485,9975 \text{ nm}$. On l'attribue à la même transition, non dans l'atome d'hydrogène, mais dans un de ses isotopes (le deutérium) présent en très faible quantité (0,015%) dans l'hydrogène naturel et dont le noyau (deutérium) a une masse $m'' = \alpha \cdot m'$ supérieure à celle du proton de masse m' .

C-1-4-1 Montrer que le produit de la longueur d'onde λ du rayonnement émis par la masse réduite μ est égal à une constante pour un atome à un électron (atome hydrogénoïde) tel que l'hydrogène.

C-1-4-2 Exprimer α en fonction du rapport $\frac{m'}{m}$ et du rapport $\frac{\lambda}{\lambda'}$ des longueurs d'onde des deux raies.

C-1-4-3 Calculer la valeur numérique de α .

C-1-5 L'expérience montre que les atomes n'émettent un rayonnement que si on les soumet à une excitation; cette excitation peut se réaliser par exemple par chauffage.

On utilise la lampe à vapeur de sodium pour éclairer des tunnels routiers. Ces lampes contiennent de la vapeur de sodium à très faible pression. Cette vapeur est excitée par un faisceau d'électrons qui traverse le tube. Les atomes absorbent l'énergie des électrons. L'énergie est restituée lors du retour à l'état fondamental sous forme de radiations lumineuses. Les lampes à vapeur de sodium émettent surtout de la lumière jaune.

Données : $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$; $c = 3,00 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$; $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$

L'analyse du spectre d'émission d'une lampe à vapeur de sodium révèle la présence des raies de longueur d'onde λ bien définie.

C-1-5-1 Quelles sont les longueurs d'onde des raies du spectre de l'atome de sodium appartenant au domaine du visible? au domaine de l'ultraviolet? au domaine de l'infrarouge?

C-1-5-2 La lumière émise par les atomes de sodium est-elle polychromatique ou monochromatique? justifier votre réponse.

C-1-5-3 Quelle est la valeur de la fréquence ν de la raie de longueur d'onde $\lambda = 589 \text{ nm}$?

C-2 Interaction électrostatique pour une distribution de charges

C-2-1 La foudre est un phénomène naturel de décharge électrostatique disruptive qui peut se produire entre deux nuages chargés (par frottement) ou entre un nuage et le sol ou la mer (chargé par influence) lorsqu'une grande quantité d'électricité statique s'est accumulée dans les nuages. Le dispositif est analogue à un condensateur plan.

La différence de potentiel électrostatique peut atteindre 10 à 20 millions de volts. Pour qu'apparaisse la foudre, un plasma (gaz de noyaux et d'électrons) est produit dans l'air sur le parcours de la charge causant l'éclair, par décharge électrique (du condensateur naturel qui s'est formé) et le tonnerre. Le tonnerre est le bruit produit par les vibrations des couches d'air comprimées et chauffées par le passage de l'éclair.

C-2-1-1 A partir du texte expliquer le phénomène de l'éclair.

C-2-1-2 Qu'est-ce que le tonnerre? Quelle différence existe-t-il entre l'éclair et le tonnerre?

C-2-1-3 Pendant un orage, un intervalle de temps $\theta = 10 \text{ s}$ sépare la vision d'un éclair et la perception du coup de tonnerre.

a) Calculer la distance d qui sépare le point d'émission de l'éclair au point où on a entendu le tonnerre.

b) Calculer la durée t_1 du trajet de la lumière.

c) Montrer qu'écrire $d = c_s \theta$ c'est faire une approximation que l'on évaluera en pourcentage.

c_s : célérité du son dans l'air = 340 m.s^{-1} et c : célérité de la lumière dans l'air $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$

C-2-2 Un condensateur plan est constitué de deux surfaces planes conductrices (armatures) en regard l'une de l'autre séparées par un isolant (le diélectrique). Lorsqu'il est chargé, les armatures portent des charges électriques opposées.

C-2-2-1 Donner le schéma électrique représentant un condensateur plan électrique chargé.

C-2-2-2 les armatures d'un condensateur plan à air ont chacune une surface $S = 200 \text{ cm}^2$ et sont séparées par une distance $e = 1,0 \text{ mm}$. On applique une tension de $U = 600 \text{ V}$ aux bornes du condensateur et on l'isole de la source de tension.

a) Rappeler l'expression de la capacité C d'un condensateur plan à air en fonction de e , S et $\epsilon_{\text{air}} = \epsilon_0$: permittivité du vide puis celle de l'énergie W du condensateur en fonction de la charge Q , de la surface S , de ϵ_0 et de l'épaisseur e . Faire l'application numérique.

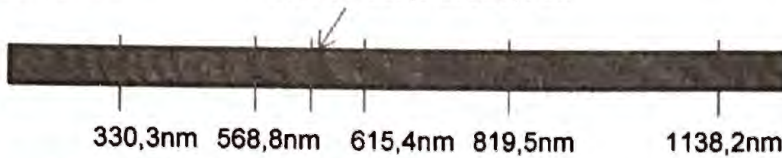
b) On éloigne l'une des armatures de l'autre d'une distance infiniment petite dx . Exprimer littéralement la variation dW de l'énergie du condensateur en fonction de Q , S et dx

c) Dédurre de l'expression de dW l'intensité F de la force d'attraction qui s'exerce entre les armatures et calculer numériquement F .

d) Montrer que F peut être écrite sous la forme : $F = \frac{1}{2} \epsilon_0 S \frac{U^2}{d^2}$; avec $d = e$

e) Evaluer l'intensité F par unité de surface et faire l'application dans le cas de la formation de la foudre produite par une différence de potentiel $U = 1,1 \cdot 10^8$ V, la distance entre le nuage et le sol étant $d = 2$ km.

Doublet : 589,0 et 589,6nm

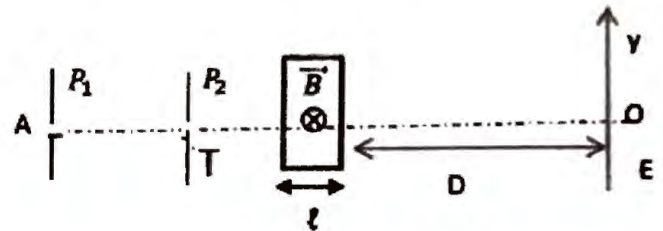


C-3-: Déflexion magnétique et déflexion électrique

Cet exercice a pour but de comparer la déflexion magnétique et la déflexion électrostatique.

Des ions oxygènes $^{16}_8O^+$ et $^{18}_8O^+$ sont éjectés avec une vitesse nulle à l'entrée A du champ électrostatique existant entre les plaques P_1 et P_2 d'un condensateur plan (figure ci-contre). Les ions sont accélérés entre les plaques P_1 et P_2 où il existe une tension $U = 800$ V.

Au-delà du trou T de la plaque P_2 , les ions pénètrent dans un champ magnétique uniforme de vecteur \vec{B} , perpendiculaire au plan de la figure et limité à une largeur $\ell = 3,0$ cm. L'intensité du champ est $B = 0,25$ T.



Un écran fluorescent E situé à la distance D de la sortie du champ magnétique s'illumine sous l'impact des ions. En l'absence du champ magnétique, les ions frappent l'écran en O. Lorsque le champ magnétique règne, on observe deux points d'impact d'ordonnées y_1 et y_2 respectivement pour les ions $^{16}_8O^+$ et $^{18}_8O^+$.

C-3-1 En notant A.u la masse d'un ion A (A : nombre de masse et $u = 1,67 \cdot 10^{-27}$ kg), donner l'expression de la vitesse de sortie v des ions en T.

C-3-2 Donner l'expression du rayon de courbure R de la trajectoire des ions dans le champ magnétique.

C-3-3 Exprimer littéralement l'ordonnée y du point d'impact; **on ne considérera pas que l'angle de déviation α est suffisamment petit pour faire l'approximation usuelle : $\sin \alpha = \tan \alpha \approx \alpha$**

C-3-4 Calculer y_1 et y_2 pour les deux sortes d'ions. ($D = 50$ cm)

C-3-5 Quelle doit être la valeur de B pour que les ions $^{16}_8O^+$ ne sortent pas du champ en frappant sur l'écran?, que vaut alors l'ordonnée y_2 du point d'impact des ions $^{18}_8O^+$

C-3-6 On reprend l'expérience précédente en remplaçant le champ magnétique par le champ électrique \vec{E} perpendiculaire à la direction AO et s'étendant sur une largeur ℓ . En exprimant littéralement y, montrer que les deux sortes d'ions frappent l'écran au même point.

C-3-7 Les deux plaques qui créent le champ électrique \vec{E} sont distantes de $d = 5$ cm. Calculer la tension U' qu'il faut appliquer à ces plaques pour obtenir une valeur de y égale à la valeur y_1 de la question C-3-4.

C-4 –Interaction électromagnétique « molécule – molécule »

Les molécules sont constituées d'atomes électriquement neutres. Cependant l'existence de charges positives au sein des noyaux et des charges négatives dans le cortège électronique fait que chaque molécule exerce un ensemble de forces d'interaction avec des molécules voisines. Ce qui donne au fluide moléculaire une certaine cohésion.

Soient A une molécule fixe et B une molécule susceptible de se déplacer. On considère qu'elles ont toutes les deux la même masse m. La force exercée par A sur B à la distance r de A est représentée par l'expression

$\vec{F}_{AB} = 12 E_{p0} \left[\frac{r_0^{12}}{r^{13}} - \frac{r_0^6}{r^7} \right] \vec{u}_{AB}$ dans laquelle E_{p0} et r_0 sont des constantes positives. La constante r_0 est homogène à une longueur et \vec{u}_{AB} est un vecteur unitaire orienté de A vers B.

C-4-1 Déterminer l'unité de la constante E_{p0}

C-4-2 Quelle est la valeur de r correspondant à la position d'équilibre ?

C-4-3 Préciser le domaine pour lequel la force est attractive et celui pour lequel elle est répulsive.

C-4-4 Etablir l'expression de l'énergie potentielle $E_p(r)$ du système des deux molécules A-B. On prendra comme origine des énergies potentielles, celle correspondant à r infini.

C-4-5

C-4-5-1 Représenter les variations de $E_p(r)$ en fonction de r.

C-4-5-2 Calculer en fonction de r_0 la valeur r_m de r pour laquelle $E_p(r) = 0$

C-4-5-3 Interpréter une oscillation possible des molécules.

C-4-6 Pour l'argon (gaz rare) $r_0 = 3,6 \text{ \AA}$ et $E_p(r_0) = -0,01 \text{ eV}$.

La condition de liquéfaction du gaz n'est réalisée que si son énergie d'agitation $E_c = kT < |E_p(r_0)|$

C-4-6-1 Evaluer l'énergie d'agitation des molécules d'argon à la température ordinaire (300 K) et justifier qu'on ne peut pas avoir l'argon liquide à la température ordinaire, c'est-à-dire qu'à la température ordinaire les deux atomes d'argon ne peuvent pas être liés.

C-4-6-2 A la température de liquéfaction de l'argon $E_c = k_B T = 0,007 \text{ eV}$, trouver la valeur de la température de liquéfaction de l'argon ; on donne : constante de Boltzman $k_B = 1,3806 \cdot 10^{-23} \text{ SI}$.

C-5 Interaction « atome – atome » au sein d'une molécule

La formation d'une molécule à partir de deux atomes est due au fait que l'énergie potentielle d'interaction de ces deux atomes, fonction de la distance qui les sépare, présente une valeur minimale. Cette valeur minimale de l'énergie est responsable du phénomène de liaison chimique entre les deux atomes.

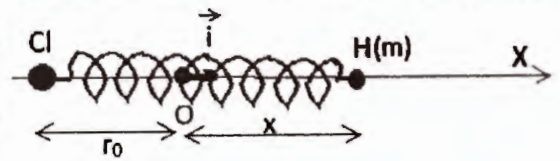
On étudie l'interaction atome-atome au sein d'une molécule de chlorure d'hydrogène H-Cl.

On peut faire l'étude de la vibration de la molécule à partir de considérations d'énergie : pour cela on ramène ce mouvement à une dimension et on se limite à des oscillations de faible amplitude. Il sera admis que la masse de l'atome de chlore Cl peut-être considérée infiniment grande vis-à-vis de la masse de l'atome d'hydrogène H (suivant cette hypothèse le centre de gravité de la molécule est constamment confondu avec le noyau de l'atome de chlore).

Les conditions suggérées amènent à représenter la molécule de chlorure d'hydrogène HCl selon le modèle d'un oscillateur harmonique schématisé ci-dessous (Cl est considéré comme fixe, et H mobile de masse m).

Il existe une position d'équilibre pour H, située à une distance r_0 du centre de l'atome de Cl. ($r_0 = 1,27 \text{ \AA}$: valeur expérimentale).

Pour toute autre position $r = r_0 + x$ de H, nous admettons que l'énergie potentielle $E_p(x)$ de la molécule est bien représentée par



$$E_p(x) = \frac{1}{2} kx^2 + \text{Cte} ; k \text{ est une constante positive } k = 4,6110^2 \text{ SI}$$

C-5-1 Retrouver que la force agissant sur l'atome d'hydrogène H est $\vec{F} = -kx\vec{i}$

C-5-2 Etablir l'équation différentielle régissant l'abscisse $x(t)$ décrivant le mouvement de vibration de l'atome d'hydrogène le long de l'axe OX (OX : l'axe confondu entre les centres d'inertie de l'atome de chlore Cl et de l'atome d'hydrogène H).

Donner la solution de cette équation.

Déterminer de la pulsation ω_V , la période et la fréquence de ce mouvement ; on prendra ; $H = 1 \text{ g/mol}$

C-5-3 Retrouver que l'énergie de vibration de l'atome d'hydrogène autour de la position r_0 est

$$\hbar\omega_V \approx 0,36 \text{ eV} \text{ où } \hbar = \frac{h}{2\pi} \text{ avec } h = \text{constante de Planck.}$$

C-5-4 Il est d'usage d'exprimer les fréquences des vibrations moléculaires en cm^{-1} c'est-à-dire l'inverse de la longueur d'onde (en cm) d'une radiation électromagnétique de même fréquence ν .

C-5-4-1 On considère que 1 cm^{-1} correspond à une valeur de fréquence de $3 \cdot 10^{10} \text{ Hz}$ et une énergie de photon $1,24 \cdot 10^{-4} \text{ eV}$. En déduire la fréquence de vibration de l'atome d'hydrogène dans la molécule de HCl en cm^{-1} .

C-5-4-2 Les fréquences de vibrations de molécules diatomiques sont connues (compte non tenu d'anharmonicité) : (H_2) : 4401 cm^{-1} ; (D_2 (deutérium)) : 3112 cm^{-1} .

C-5-4-2-1 Donner les énergies correspondant à ces modes de vibrations pour chaque type de molécule.

C-5-4-2-2 Calculer les valeurs des constantes k correspondant aux différentes molécules.

Masses molaires $D : 2 \text{ g.mol}^{-1}$, $H : 1 \text{ g.mol}^{-1}$; célérité de la lumière $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$; $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$ et constante d'Avogadro $N_A = 6,022 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$

C-5-4-2-3 La transition entre le niveau fondamental et le niveau 1 pour la molécule de monoxyde de carbone CO est caractérisée par une longueur d'onde égale $\lambda = 4673 \text{ nm}$ (précisément il s'agit de la molécule $^{12}\text{C}^{16}\text{O}$)

Déterminer pour cette molécule :

- La constante de la force de liaison
- L'amplitude de la vibration

On donne les masses atomiques en kg.mol^{-1} : $M(\text{O}) = 16 \cdot 10^{-3}$ et $M(\text{C}) = 12 \cdot 10^{-3}$.

Partie D : Interaction forte (13 points)

Les interactions attractives fortes entre nucléons sont responsables de la cohésion du noyau atomique surpassant ainsi les interactions répulsives de type électrostatiques entre protons :

- Elles sont spécifiques, différentes des forces de gravitation, différentes des forces électrostatiques qui seraient inexistantes entre neutrons-neutrons ou neutrons-protons et répulsives entre protons.
- Elles sont très intenses puisqu'elles l'emportent sur les répulsions électrostatiques et des énergies de liaisons très élevées.
- Elles sont à court rayon d'action : nulles à 10^{-10} m et très attractives entre 10^{-14} m et 10^{-15} m et répulsives à 10^{-16} m puisque les nucléons restent séparés.
- Elles sont indépendantes de la charge puisque sensiblement identiques pour les couples proton-proton, neutron-proton et neutron- neutron.
- Elles sont saturables : un nucléon donné tend à s'entourer d'un nombre déterminé d'autres nucléons ; après quoi il ne se manifeste plus d'action spécifiquement nucléaire.

D-1- Interaction « nucléon – nucléon »

L'interaction nucléon-nucléon étant de courte portée, l'énergie potentielle moyenne reflète la densité nucléaire. On adopte l'énergie potentielle de Woods- Saxon :

$$E_p(r) = -V_0 \left(1 - e^{-\frac{(r-R)}{a}} \right)^{-1} ; \text{ les valeurs courantes des paramètres qu'on prendra : profondeur } V_0 = 45 \text{ MeV,}$$

rayon $R = r_0 A^{\frac{1}{3}}$ avec $r_0 = 1,25$ fm et diffusivité $a = 0,65$ fm et $1 \text{ fm} = 10^{-15}$ m

D-1-1 Dédure de $E_p(r)$ l'expression de la force $F(r)$ agissant dans le champ d'un autre nucléon, justifier que cette force est attractive.

Application numérique : calculer l'intensité de la force d'interaction entre deux nucléons pour chacun des noyaux extrêmes : hydrogène ${}^2_1\text{H}$ et lawrencium ${}^{260}_{103}\text{Lr}$; on prendra la distance moyenne nucléon-nucléon $r = 1,5$ fm ; on comparera les résultats obtenus.

D-1-2 Des expressions de forces de gravitation $\vec{f}_G = -K \frac{m_S m_P}{r^2} \vec{u}_r$, et de la force d'interaction électromagnétique coulombienne $\vec{f}_E = \frac{q_A q_B}{4\pi\epsilon_0 r^2} \vec{u}_r$ et pour le cas des deux de protons situés dans le noyau d'Helium (${}^4_2\text{He}$), évaluer le rapport f_E/f_G pour une même distance r ; on donne : $q_A = q_B = 1,6 \cdot 10^{-19}$ C, et $m_p = 1,67 \cdot 10^{-27}$ kg.

On suppose que les lois de gravitation sont valables à l'échelle subatomique.

D-1-3 Evaluer à partir de la réponse à la question D-1-1 l'intensité de la force d'interaction nucléaire entre deux protons d'un noyau distants de 1,5 fm et la force d'interaction coulombienne de ces deux protons situés à la même distance $r = 1,5$ fm.

D-1-4 Comparer ainsi les forces d'interaction gravitationnelle, électromagnétique et nucléaire qui se manifestent au sein des noyaux et conclure.

D- 2 : Energie de liaison d'un noyau

Les interactions entre nucléons au sein du noyau sont des interactions fortes de courte portée.

Lorsque des nucléons isolés se rapprochent pour former un noyau, la force attractive effectue un travail positif qui correspond à une variation d'énergie potentielle de masse négative, donc à une variation de masse négative d'après la relation d'Einstein.

Selon Einstein l'énergie de liaison est donnée par : $\Delta E = \Delta M \cdot c^2 = [M - (Zm_p + Nm_n)] \cdot c^2$

Selon Bethe et Weizsacker l'énergie de liaison d'un noyau est donnée, en MeV, par la formule :

$$\Delta E = - \left[15,56 \cdot A - 17,23 \cdot \sqrt[3]{A^2} - 0,583 \frac{Z(Z-1)}{\sqrt[3]{A}} - 23,6 \frac{(N-Z)^2}{A} + \frac{12}{\sqrt{A}} \right] \text{ formule valable pour}$$

les noyaux ayant un nombre de protons pair et un nombre de neutrons pair.

D-2-1- Que peut-on dire du signe de l'énergie de liaison ?

D-2-2 Par ces deux formules évaluer les énergies de liaison des noyaux d'helium ${}^4_2\text{He}$ et du carbone ${}^{12}_6\text{C}$ et de l'uranium ${}^{238}_{92}\text{U}$. On donne : $m_{{}^4_2\text{He}} = 4,0015$ u ; $m_{{}^{238}_{92}\text{U}} = 238,0508$ u ; $m_{{}^{12}_6\text{C}} = 14,0032$ u ; $m_p = 1,00728$ u,

$m_n = 1,00866$ u et $1 \text{ u} = 931,5 \text{ MeV}/c^2$ Evaluer l'écart relatif entre les valeurs trouvées en appliquant les deux formules et conclure.

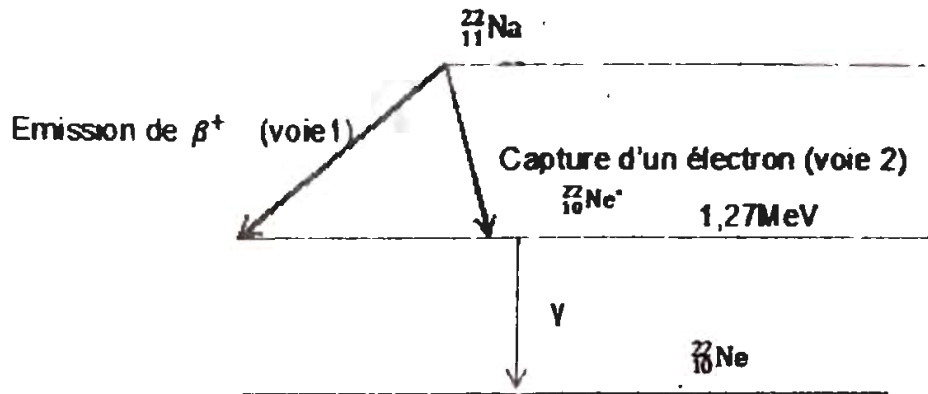
D-2-3 L'énergie de liaison d'un noyau dépend du nombre de ses nucléons en première approximation, évaluer l'énergie de liaison moyenne par nucléon dans les cas des noyaux précédents qu'on évaluera à partir de la formule : $\Delta E = \Delta M \cdot c^2 = [M - (Zm_p + Nm_n)] \cdot c^2$:

D-3 : Niveaux d'énergie dans le noyau

On donne parmi tant d'autres un modèle à couches au noyau atomique. C'est un modèle inspiré de l'atome. De sorte, dans le noyau les nucléons ne sont pas tous au même niveau d'énergie. Lorsque le noyau est dans son plus grand état de stabilité, on dit que le noyau est dans son état fondamental.

Généralement un système de particules n'existe de façon liée que dans certains états d'énergie formant une suite discontinue.

Cette propriété est vérifiée non seulement par les molécules et les atomes, mais aussi pour les noyaux. La durée de vie d'un état excité est en général très brève, de l'ordre 10^{-22} s. La desexcitation partielle ou totale est obtenue par émission d'un photon γ correspondant à un rayonnement électromagnétique de très courte longueur d'onde (typiquement de 10^{-2} à 10^{-3} nm)



D-3-1 A l'état fondamental (ici de référence) l'énergie du $^{34}_{16}S$ est $E_1 = 0,00$ MeV

Pour le 1^{er} état excité l'énergie du noyau $^{34}_{16}S$ est $E_1 = 2,13$ MeV

Pour le 2^{er} état excité l'énergie du noyau $^{34}_{16}S$ est $E_2 = 3,30$ MeV

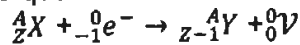
Le noyau peut se désexciter par émission de « rayonnements » γ .

Donner les variations d'énergie du noyau correspondant et ainsi que les longueurs d'onde λ de ces trois rayonnements.

D-3-2 Faire le schéma représentatif de ces transitions

Partie E : Interaction faible (10 points)

La théorie de la physique moderne indique que les électrons des couches atomiques ont une certaine probabilité de présence « à l'intérieur » du noyau. Cette présence se manifeste par une interaction fondamentale de faible intensité entre ces électrons et les nucléons. C'est par l'intermédiaire de ce processus qu'un électron des couches atomiques (généralement couche 1s et parfois des couches non s) est « capturé » par un noyau A_ZX et suivi d'une émission d'un neutrino ν (particule élémentaire de masse quasi nulle et de charge nulle symbolisée par $^0_0\nu$) ; soit :



Le processus élémentaire semblable à cette réaction est : $p + e^- \rightarrow n + \nu$

avec $p = ^1_1p$: proton, $e^- = ^0_{-1}e^-$: électron; $n = ^1_0n$: neutron.

Le processus inverse du précédent est $n + \bar{\nu} \rightarrow p + e^-$

L'interaction faible explique aussi la désintégration β (β^- et β^+) : $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}$ et $p \rightarrow n + e^+ + \nu$ ($e^+ = ^0_1e^+$)

E-1 Capture électronique et émission β^+

Le sodium est employé comme source de positrons β^+ ($^0_1e^+$) et sa période est $T = 2,6$ ans. Il se désintègre presque à 100% vers le premier état excité du $^{22}_{10}Ne^*$ situé à 1,27 MeV. Cette désintégration se fait suivant deux voies (Voir figure ci-après).

E-1-1 Donner le type d'interaction qui est responsable de l'émission β^+ ou de la capture électronique par un noyau de l'atome.

E-1-2 Ecrire l'équation correspondant à la capture d'un électron par le noyau de sodium $^{22}_{11}Na$ (voie 2) et celle correspondant à l'émission de β^+ par le même noyau (voie 1).

E-1-3 La probabilité de désintégration par unité de temps de $^{22}_{11}Na$ en β^+ est de 90%, évaluer la probabilité de capture électronique et en déduire la période partielle de capture électronique de $^{22}_{11}Na$.

E -2 Détection sur Terre des neutrinos produits au Soleil

Pour étudier le mécanisme de fusion dans le soleil (dans les étoiles), on se propose de détecter les neutrinos produits qui arrivent sur terre. En effet la détection des neutrinos est particulièrement intéressante car elle ouvre la possibilité d'accéder directement aux caractéristiques du cœur du soleil (des étoiles) telles que sa température, sa densité, sa composition, car les photons issus du cœur sont immédiatement absorbés par la matière alors que les neutrinos peuvent traverser une étoile sans que leur flux ne soit atténué.

E -2-1 Les neutrinos sont émis lors d'une réaction du type ${}_1^1\text{H} + {}_1^1\text{H} \rightarrow {}_1^2\text{H} + {}_1^0\text{e}^+ + {}_0^0\nu$

La détection des neutrinos se fait à partir de la réaction élémentaire suivante : ${}_0^0\nu + {}_0^1\text{n} \rightarrow \text{p} + {}_{-1}^0\text{e}^-$ (proton ${}_1^1\text{p}$, neutron : ${}_0^1\text{n}$, électron : ${}_{-1}^0\text{e}^-$, positron : ${}_1^0\text{e}^+$).

On utilise pour la détection des neutrinos, les neutrons des atomes de Gallium contenus dans un échantillon de masse 30 tonnes et la réaction de détection pouvant aussi s'écrire : $\nu + {}_{31}^{71}\text{Ga} \rightarrow {}_{32}^{\text{A}}\text{Y} + {}_{-1}^0\text{e}^-$; Calculer Z et A.

E -2-2 Pour essayer le détecteur, on place devant lui une source de neutrinos connue ${}_{24}^{51}\text{Cr}$ (qui émet des neutrinos) obtenue par d'autres techniques.

La réaction de production des neutrinos avec le chrome est : ${}_{-1}^0\text{e}^- + {}_{24}^{51}\text{Cr} \rightarrow {}_{24}^{\text{A}'}\text{X} + \nu$ avec ${}_{-1}^0\text{e}^-$ un électron des couches atomiques du chrome capturé par son noyau au moyen d'interaction faible. Calculer Z' et A'.

E-2-3- L'activité de la source de chrome (${}_{24}^{51}\text{Cr}$) produisant les neutrinos est de 7.10^{16}Bq . Le détecteur forme une surface de 10 m^2 enroulée autour de cette source.

E-2-3-1 Calculer le nombre de neutrinos par cm^2 et par seconde reçus par le détecteur.

E-2-3-2 Le flux solaire est $6,5.10^{10}$ neutrinos. $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$. Comparer le flux de la source chrome par rapport au flux solaire.

E-2-3-3 La période du ${}_{24}^{51}\text{Cr}$ est un mois, au bout de combien de mois l'activité de la source de chrome sera-t-elle égale à 10^{-2} fois celle du soleil ? (C'est dire le moment où l'activité de la source de chrome est très inférieure à celle du soleil).

FIN DE SUJET