

SESSION 2004CLASSES TERMINALESSCIENCES PHYSIQUESTHEME : LES PARTICULES ELEMENTAIRESPREMIERE PARTIEA LA DECOUVERTE DE L'ATOME

* Dans cette première partie on considère que les lois de la mécanique classique sont applicables.

PARTIE (A) : Electrons et nucléons (18 points)

A-1) Rappeler les constituants fondamentaux de l'atome ; préciser leur charge et donner l'ordre de grandeur de leur masse. (03 pts).

A-2) Dans le référentiel terrestre, on étudie le mouvement des électrons sous l'action d'un champ électrique uniforme existant entre deux plaques métalliques A et C, verticales, distantes de $d = 2$ cm. Entre ces plaques est établie une tension $U = V_A - V_C = 200$ V.

A-2-1) Un électron est émis de la plaque A avec une vitesse $\vec{v}_0$ de valeur $v_0 = 1,31 \cdot 10^7$ m.s⁻¹ et de direction horizontale. Il arrive en C avec une vitesse de valeur $v = 1,00 \cdot 10^7$ m.s⁻¹.

a) Quelle est la nature du mouvement de l'électron entre A et C ? Justifier la réponse. On considérera que le poids de l'électron est négligeable devant la force électrostatique (01 pt).

b) Exprimer la charge massique $\frac{|q|}{m}$ de l'électron en fonction de v_0 , v et U puis la calculer. (01 pt)

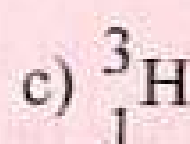
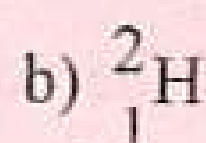
c) Quelle valeur de la masse m de l'électron en déduit-on sachant que $|q| = e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ C ? (01 pt).

A-2-2) L'électron est encore émis de la plaque A avec la vitesse $\vec{v}_0$ inclinée de $\alpha = 30^\circ$ au-dessous de l'horizontale. La vitesse $\vec{v}_0$ a même valeur numérique que précédemment.

a) Déterminer l'équation de la trajectoire de l'électron entre A et C et les caractéristiques du vecteur vitesse à son arrivée sur la plaque C (composantes horizontale et verticale). (03 pts).

b) En déduire les coordonnées de l'électron en C. (02 pts).
Pour la masse de l'électron on prendra : $m = 9,1 \cdot 10^{-31}$ kg.

A-3) On donne les nucléides ci-après :



A-3-1) Préciser la nature et le nombre des constituants des noyaux correspondants (03 pts).

A-3-2) Définir le concept d'isotope et en donner des exemples.

(01 pt)....2

CLASSES TERMINALES

A-3-3) Calculer l'énergie de liaison par nucléon pour l'hélium 4, pour l'uranium 235 et pour l'uranium 238. Conclure. (03 pts).

On donne : masse du neutron : $m_n = 1,00867 \text{ u}$

masse du proton : $m_p = 1,00728 \text{ u}$

masse du noyau d'uranium 238 : $m(^{238}\text{U}) = 238,00018 \text{ u}$

masse du noyau d'hélium 4 : $m(\text{He}) = 4,00150 \text{ u}$

masse du noyau d'uranium 235 : $m(^{235}\text{U}) = 234,99332 \text{ u}$

unité de masse atomique : $1 \text{ u} = 931,5 \text{ MeV}/c^2$

PARTIE (B) : Expériences relatives au noyau atomique. (12 points)

Lire le texte et répondre aux questions suivantes.

En 1911, Ernest Rutherford, devenu professeur à Manchester a établi l'existence du noyau de l'atome : en bombardant une mince feuille d'or avec des noyaux d'hélium ou particules α , ses deux jeunes collaborateurs Hans Geiger et Ernest Marsden ont observé que quelques particules étaient fortement déviées, la plupart traversant la feuille sans déviation. Rutherford en déduit que les charges positives et presque toute la masse de l'atome sont rassemblées dans un très petit volume, le noyau.

L'année suivante, les travaux de Soddy, Fajans, Von Hevesy et Russel, aboutissent à la loi de déplacement ou loi de valence ; elle indique que la radioactivité β^- conduit à la formation d'un nouvel élément. Le nouvel élément est à une colonne vers la droite de l'élément père dans la classification périodique.

En 1913 Henry Moseley, assistant de Rutherford démontre expérimentalement que le nombre d'électrons atomiques et le nombre de charges positives du noyau sont égaux au numéro atomique de l'élément dans la classification périodique. La même année, le danois Niels Bohr montre que le noyau est le siège de la radioactivité alors que le cortège d'électrons de l'atome est responsable des réactions chimiques.

Dossier « pour la science » Hors série.

B-1)

B-1-1) L'expérience de Rutherford permet la découverte du noyau et la structure lacunaire de la matière. Relever dans le texte, les expressions mettant en évidence ces découvertes en les interprétant succinctement. (02 pts)

B-1-2) Quel passage du texte fait apparaître la neutralité électrique de la matière ? (01 pt)

B-2) Comment appelle-t-on une réaction au cours de laquelle un nucléide est transformé en un autre nucléide ? (01 pt)

B-3) Les alchimistes, grâce à la « pierre philosophale » (série d'opérations rituelles et irrationnelles) croyaient pouvoir changer le « vil » plomb en « métal par excellence », l'or. Justifier l'utopie de leur projet. (02 pts)

B-4) En 1986, lors de l'accident survenu à la centrale nucléaire de Tchernobyl (URSS), une importante quantité de radio-iode s'est disséminée dans l'environnement.

Expliquer l'effet physiologique de ce radioélément. (02 pts)

B-5) Justifier l'utilisation de certains éléments radioactifs en radiothérapie. (02 pts)

B-6) Donner un exemple de l'utilisation d'éléments radioactifs en radiothérapie. (02 pts)

CLASSES TERMINALESPARTIE (C) : Application de l'expérience de Rutherford – Densité du noyau (15 points).

Comme décrit dans le texte précédent, Rutherford et ses collaborateurs, pour comprendre la répartition des charges électriques au sein de l'atome, envoient un faisceau étroit et parallèle de particules α (noyau d'hélium ${}^4_2\text{He}^{2+}$) émises par une source radioactive, sur une feuille d'or de très faible épaisseur. Ils observent la déviation subie par les particules. La plupart des particules α ne subissent aucune déviation. Quelques rares particules α sont déviées à des angles de plus de 90° et, donc, sont renvoyées vers l'arrière.

Données :

m = masse de la particule α ; Z = numéro atomique de l'élément or ; e = charge élémentaire

On considère une particule α , émise par la source radioactive à la vitesse $\vec{v}_0$. Cette particule est déviée d'un angle $\beta = 180^\circ$ (ce qui est observé dans la proportion de 1 sur 100 000 projectiles). On peut admettre que cette particule a subi une collision frontale avec le noyau et que ce dernier reste immobile. On suppose aussi que la source radioactive est placée à une distance infinie du noyau.

C-1)

C-1-1) Donner l'expression de la force électrostatique qu'exerce le noyau d'or sur la particule α . On désignera par r la distance entre les centres des deux noyaux. (01 pt)

C-1-2) Etablir l'expression du travail élémentaire de cette force lorsque la particule α se rapproche de dr du noyau. (02 pts)

C-1-3) En déduire l'expression de l'énergie potentielle électrostatique du système {noyau + particule α } en fonction des données. On admet que l'énergie potentielle électrostatique est nulle lorsque la particule est à une distance infinie du noyau. (03 pts)

C-2). En utilisant la conservation de l'énergie totale du système, établir la relation donnant la distance minimum d'approche r_m en fonction des données. (04 pts)

C-3. Calculer cette valeur dans le cas où les particules α ont une vitesse initiale $v_0 = 1,50 \cdot 10^9 \text{ cm.s}^{-1}$.

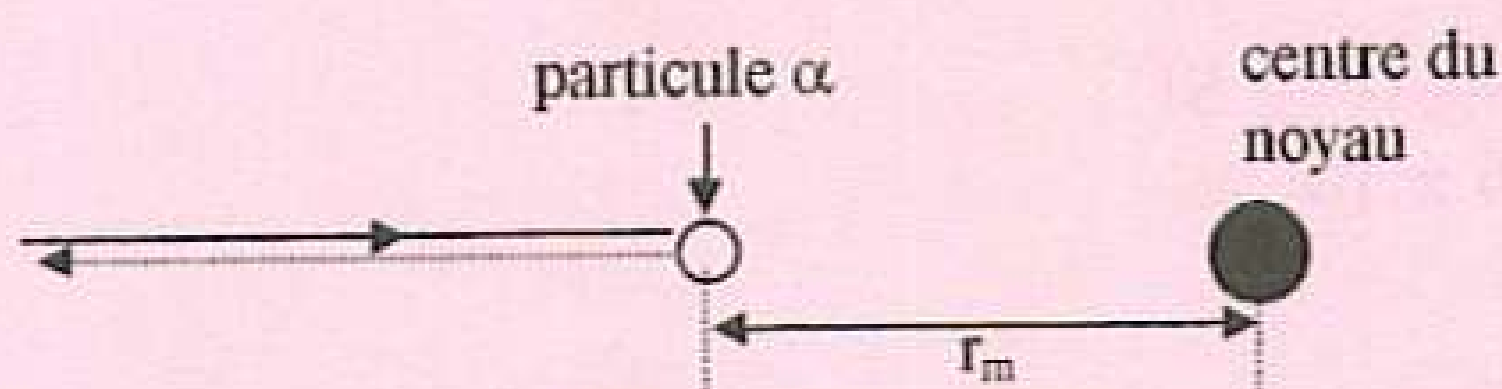
Le numéro atomique de l'or vaut $Z = 79$.

Pour la masse du proton m_p et la masse du neutron m_n ; on prendra $m_p = m_n = 1,67 \cdot 10^{-24} \text{ g}$

Le noyau d'hélium a un nombre de masse $A = 4$. Permittivité du vide : $\epsilon_0 = \frac{1}{36 \pi \cdot 10^9} \text{ SI}$

Quelle conclusion concernant le rayon du noyau peut-on tirer d'une telle expérience ? (02 pts)

C-4). En considérant que la formule $r = 1,2 \cdot 10^{-13} \sqrt[3]{A}$ donne, en centimètre, le rayon du noyau d'un élément de nombre de masse A , calculer la densité du noyau d'or ($A = 197$) (03 pts).



CLASSES TERMINALESPARTIE (D) : Atome de Bohr (15 points)

N.B. : On négligera toujours le poids de l'électron devant la force électrostatique qu'il subit. On se placera dans le référentiel lié au proton ; ce référentiel sera considéré comme galiléen. On admettra que le système proton-électron est conservatif.

D-1) L'atome d'hydrogène est constitué d'un proton autour duquel gravite un électron, sur une orbite circulaire de rayon r , selon un mouvement circulaire uniforme.

D-1-1) Définir un système conservatif. (01 pt)

D-1-2) Exprimer la force électrique $\vec{f}$ exercée par le proton sur l'électron en fonction de la charge élémentaire e et du rayon r de l'orbite. (01 pt)

D-1-3) En déduire les expressions de l'énergie cinétique E_c et de l'énergie potentielle E_p de l'électron en fonction de e et r ainsi que celle de l'énergie mécanique E . Que représente E pour l'atome ? (04 pts)

D-2) D'après la théorie du rayonnement électromagnétique de Maxwell, avec ce modèle, l'énergie de l'électron varie de manière continue en fonction de r , ce qui a des conséquences contradictoires avec les phénomènes observés.

Bohr postula alors l'existence de trajectoires privilégiées correspondant aux niveaux d'énergie de l'atome et sur lesquelles l'électron ne rayonne pas d'énergie. Elles sont déterminées par une condition mathématique imposée au moment de la quantité de mouvement de l'électron :

$$mvr = \frac{nh}{2\pi} \quad n \in \mathbb{N}^* ; \quad h : \text{constante de Planck} ; \quad m : \text{masse de l'électron}$$

D-2-1) Exprimer r en fonction de e , m , h et n . (02 pts)

D-2-2) Calculer le rayon de l'atome d'hydrogène à l'état fondamental ($n = 1$). (01 pt)

D-2-3) En déduire la vitesse de l'électron sur cette orbite.

D-3) Montrer que pour l'atome d'hydrogène l'énergie mécanique peut se mettre sous la forme :

$$E_n = \frac{-13,6}{n^2} \text{ en électron-volt (eV).} \quad (03 \text{ pts})$$

D-4) Quelle est la valeur E_i de l'énergie de l'atome d'hydrogène à l'état fondamental ? Vérifier que l'énergie de l'atome d'hydrogène est quantifiée.

Définir l'énergie d'ionisation E_i de l'atome d'hydrogène et donner sa valeur. (03 pts)

Données :

masse de l'électron : $m = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$

Charge élémentaire : $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$

Constante de Planck : $h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$

Permittivité du vide : $\epsilon_0 = \frac{1}{36 \pi \cdot 10^9} \text{ SI}$

CLASSES TERMINALES

DEUXIEME PARTIE

LES PARTICULES DE GRANDE ENERGIE - ACCELERATEUR DE PARTICULES.

Le parties E, F, G et H ne sont pas indépendantes.

PARTIE (E) : L'accélérateur de Stanford (USA)

(10 points)

Lire le texte et répondre aux questions suivantes.

Le plus puissant accélérateur linéaire à électrons est actuellement celui de Stanford en Californie (USA). Il est long de 3,2 km et est constitué d'une succession de cavités accélératrices (équivalentes à des plaques trouées) qui procurent en fin de parcours, aux électrons une énergie cinétique de 50 GeV. En moins d'un mètre, les électrons acquièrent une vitesse proche de la célérité de la lumière. Dans la suite de leur parcours dans l'accélérateur, leur énergie augmente régulièrement, mais leur vitesse n'augmente pratiquement plus. En fin d'accélération, leur énergie atteint les 50 GeV requis, mais leur vitesse est toujours inférieure à la célérité de la lumière, tout s'en étant rapprochée à 10^{-10} près, mais sans la dépasser.

- E-1) Quelle serait, selon la mécanique classique (newtonienne), la vitesse d'un électron en fin d'accélération ?
(01 pt)
- E-2) Ce résultat correspond-t-il à la réalité ? Justifier. Quelle conclusion peut-on en tirer sur la validité des lois de la mécanique classique ?
(01 pt)
- E-3) Que peut-on ainsi dire de la célérité de la lumière ?
(02 pts)
- E-4) Le tableau ci-après donne quelques valeurs de la vitesse v des électrons obtenues expérimentalement pour différentes valeurs de leur énergie cinétique E_c .

E_c (MeV)	0,5	1,0	1,5	3,0	4,5	8,0	12,0	15,0
v (10^8 m.s ⁻¹)	2,25	2,73	2,88	2,91	2,92	2,94	2,97	2,99
$\frac{v^2}{c^2}$								

- E-4-1) Recopier puis compléter le tableau (c représente la vitesse de la lumière dans le vide).(02 pts).
- E-4-2) Tracer la courbe $\frac{v^2}{c^2} = f(E_c)$. Interpréter le résultat obtenu.
(02 pts)
- E-4-3 Dans le même repère, ébaucher la courbe donnant la variation de $\frac{v^2}{c^2}$ en fonction de E_c en mécanique classique. En déduire approximativement la limite de validité de la mécanique classique.
(02 pts).

On rappelle :

- masse de l'électron : $m = 9,1.10^{-31}$ kg
- célébrité de la lumière dans le vide : $c = 3,0.10^8$ m.s⁻¹.

PARTIE (F) : Quantité de mouvement et énergie cinétique d'une particule relativiste (06 points)

Toutes les lois de la mécanique classique ne sont plus valables pour caractériser le mouvement d'une particule de grande énergie (particule dont la vitesse est proche de celle de la lumière). On utilise alors les lois plus générales de la mécanique relativiste telles que :

$$\vec{p} = \gamma m \vec{v}, \quad \sum \vec{F}_{\text{ext}} = \frac{d\vec{p}}{dt} \quad \text{et} \quad E_c = (\gamma - 1)mc^2 \quad \text{avec : } \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} \quad \text{et} \quad \beta = \frac{v}{c}$$

m : masse de la particule (pour l'électron $m = 0,51 \text{ MeV}/c^2$).

v : vitesse de la particule.

c : célérité de la lumière ($c = 3,0 \cdot 10^8 \text{ m/s}$).

$\vec{p}$: vecteur quantité de mouvement de la particule.

E_c : énergie cinétique de la particule.

N.B. : Pour une particule relativiste la vitesse v est telle que $0,46 c \leq v < c$

F-1) A partir des expressions de la quantité de mouvement $\vec{p}$ et de l'énergie cinétique E_c en mécanique relativiste, retrouver celles de la mécanique classique ($v \ll c$). (02 pts)

Conclure.

(01 pt)

On rappelle que si $\varepsilon \ll 1$, $(1 + \varepsilon)^n \cong 1 + n\varepsilon$

F-2) Pour des particules relativistes, montrer que l'expression de l'énergie cinétique est en accord avec l'expérience décrite dans le texte. (01 pt)

F-3) Exprimer en fonction de c , m et E_c la vitesse acquise par un électron sortant de l'accélérateur de Stanford. Calculer cette vitesse. (02 pts)

PARTIE (G) : Energie totale d'une particule (06 points)

Einstein postula qu'une particule de masse au repos m possède une énergie appelée énergie de masse $E_0 = mc^2$. L'énergie totale E d'une particule en mouvement est donc égale à la somme de son énergie cinétique ou « énergie externe » E_c et de son énergie de masse ou « énergie interne » E_0 .

G-1) Montrer que $E = \gamma mc^2$ (01 pt)

G-2)

G-2-1) Exprimer p en fonction de m , γ et c . Montrer que l'énergie totale peut se mettre sous la forme

$$E = \sqrt{(pc)^2 + (mc^2)^2} \quad (01 \text{ pt})$$

G-2-2) Etablir la relation $\beta = \frac{pc}{E}$. (01 pt)

G-2-3) Montrer à l'aide des relations précédemment établies qu'une particule de masse nulle se déplace à la vitesse de la lumière. Citer un exemple d'une telle particule. (01 pt)

G-3) Exprimer l'énergie cinétique d'une particule en mécanique relativiste en fonction de p , m et c . (01 pt)

G-4) Exprimer l'énergie cinétique d'une particule en mécanique newtonienne en fonction de p et m .

Retrouver cette expression à partir de la relation $E = \sqrt{(pc)^2 + (mc^2)^2}$ lorsque $pc \ll mc^2$

(01 pt).../...7

PARTIE (H) : Application (06points).

A la sortie de l'accélérateur de Stanford décrit dans la partie (E), on installe un champ magnétique $\vec{B}$, vertical, perpendiculaire à la vitesse des électrons, sur une longueur d . On admettra que le mouvement des électrons est circulaire uniforme dans l'espace champ magnétique. On admet également qu'une particule relativiste ou non, de charge q , décrivant un arc de cercle de rayon R sous l'influence d'un champ magnétique $\vec{B}$, possède une quantité de mouvement de valeur p telle que : $p = |q| B R$.

H-1) Après avoir évalué la quantité de mouvement des électrons juste à leur sortie de l'accélérateur, calculer le rayon de la trajectoire qu'ils décrivent dans le champ magnétique. (01 pt)

H-2) Quelle est la nature du mouvement des électrons à la sortie du champ magnétique ? Justifier la réponse. (01 pt)

H-3) On place un écran à la sortie du champ à une distance D de celui-ci. Faire un schéma comprenant l'espace champ magnétique, l'écran et la trajectoire des électrons. Etablir l'expression de la déflection magnétique puis la calculer. (02 pts)

H-4) Un cristal métallique de masse M est fixé au point d'impact des électrons sur l'écran. Il émet des photons X dus aux chocs avec les électrons.

H-4-1) En écrivant la conservation de l'énergie, exprimer l'énergie E_x d'un photon X en fonction des énergies cinétiques E_{c1} et E'_{c1} de l'électron avant et après le choc respectivement, et de l'énergie cinétique du cristal E'_{c2} . (01 pt)

H-4-2) A quelle(s) condition(s) l'énergie E_x est-elle maximale ? En déduire la longueur d'onde du photon X correspondant. Ce photon est-il visible ? Justifier. (01 pt)

On donne : $B = 5T$; $d = 2m$; $D = 25m$.

PARTIE I : Chambre à bulles. Chocs élastiques entre particules de grande énergie (12 points).**• Principe de fonctionnement d'une chambre à bulles**

Une chambre à bulles contient un liquide (hydrogène ou propane) dont la température est légèrement inférieure à sa température d'ébullition.

Lorsque des particules chargées pénètrent dans une chambre à bulles, elles agissent sur les nuages électroniques des atomes de liquide, à qui elles cèdent une faible fraction de leur énergie. Si la pression est brusquement diminuée, par détente d'un piston, le liquide va entrer en ébullition. Cette ébullition commence plus tôt sur le trajet des particules, et c'est là que les premières bulles se forment. Ces particules laissent donc une trace sur le liquide. On laisse grossir les bulles pendant quelques millisecondes et on photographie ensuite les positions successives des bulles.

Les particules neutres n'agissent pas sur les nuages électroniques et ne provoquent donc pas l'apparition de bulles : les particules neutres ne laissent pas de traces dans les chambres à bulles.

Pour déterminer les quantités de mouvement des particules chargées, on incurve leurs trajectoires en faisant agir un champ magnétique intense, créé par des courants électriques dans des circuits analogues à des bobines de Helmholtz.

On rappelle qu'une particule, relativiste ou non, de charge q , décrivant un arc de cercle de rayon R sous l'influence d'un champ magnétique $\vec{B}$, possède une quantité de mouvement de valeur p telle que :

$$p = |q| B R.$$

Dans une chambre à bulles, on observe un événement chaque fois que la particule incidente heurte une autre particule.

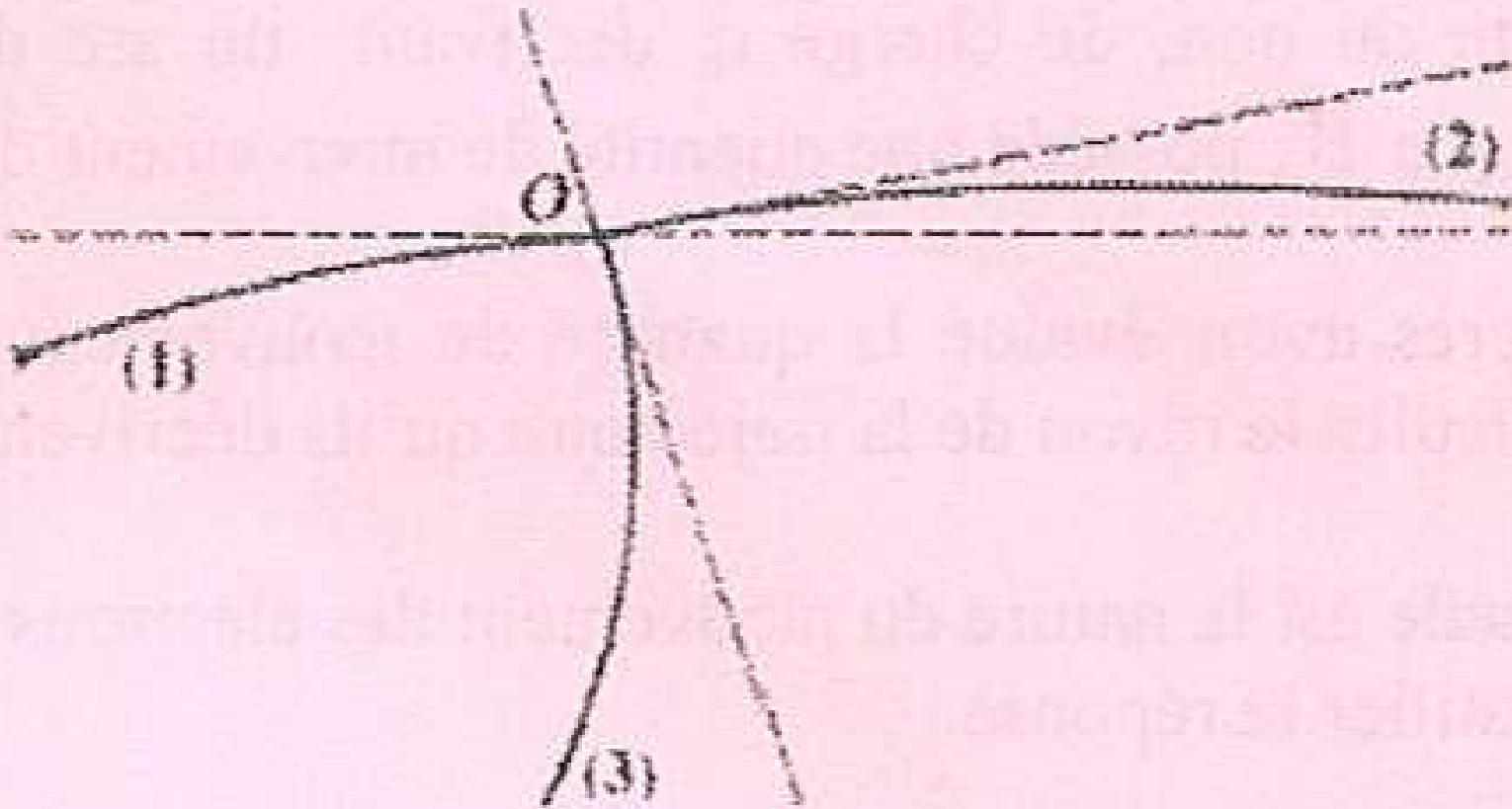
Le plus souvent, le choc se produit avec un noyau d'hydrogène de la chambre, c'est à dire avec un proton que l'on considérera, avec une très bonne approximation, comme étant au repos.

Ainsi l'hydrogène d'une chambre à bulles joue deux rôles : c'est une cible particulièrement simple (proton au repos) et il permet aussi de visualiser les trajectoires.

CLASSES TERMINALES

Etude d'un choc de particules.

Dans une chambre à bulles, on étudie le choc d'un proton (1) sur un proton (0) au repos. On numérote (2) et (3) les protons issus de l'interaction. L'étude de la photographie à permis de tracer la figure ci-contre ; celle-ci représente les traces de particules et donne la disposition des tangentes au point d'impact.



Les rayons de courbures mesurés sur la figure valent respectivement :

$R_1 = 4,30\text{ m}, \quad R_2 = 4,10\text{ m}$
 $\text{et } R_3 = 0,85\text{ m}.$

La quantité de mouvement du proton incident est :

$P_1 = 2026\text{ MeV}.\text{c}^{-1}.$

I-1) Sachant que le vecteur champ magnétique est orthogonal au plan de la trajectoire, déterminer son sens. (01 pt)

I-2) Exprimer la norme B du champ magnétique en fonction de la quantité de mouvement, de la charge du proton (1) et du rayon de sa trajectoire. Calculer B. (01 pt)

I-3) I-3-1 Calculer les quantités de mouvement P_2 et P_3 des protons issus de l'interaction. (01 pt)

I-3-2 Sur la figure en annexe, copie de la figure ci-dessus, représenter les vecteurs quantités de mouvement $\vec{P}_1, \vec{P}_2$ et $\vec{P}_3$. Quelle remarque peut on faire ? Conclure. (02 pts)

I-4)

I-4-1) Pour chacun des protons (1), (2) et (3) calculer l'énergie totale E et l'énergie cinétique E_c . (02 pts)

I-4-2) Recopier puis compléter le tableau suivant : (02 pts)

	Proton 1	Proton 2	Proton 3
P (MeV.C ⁻¹)			
E (MeV)			
E _c (MeV)			

I-4-3) Calculer l'énergie totale du système avant le choc [protons (1) et (0)] et l'énergie totale après le choc [protons (2) et (3)]. (01 pt)

I-4-4) Un choc est dit élastique si les particules sortantes après le choc sont identiques aux particules avant le choc. Quelles sont les lois de conservation du choc élastique de particules de grande énergie que ces résultats permettent de vérifier ? Enoncer ces lois. (02 pts)

On prendra : masse du proton $m_p = 938\text{ MeV} / c^2$.

LA PAGE 9/9 EST A RENDRE AVEC LA COPIE.

