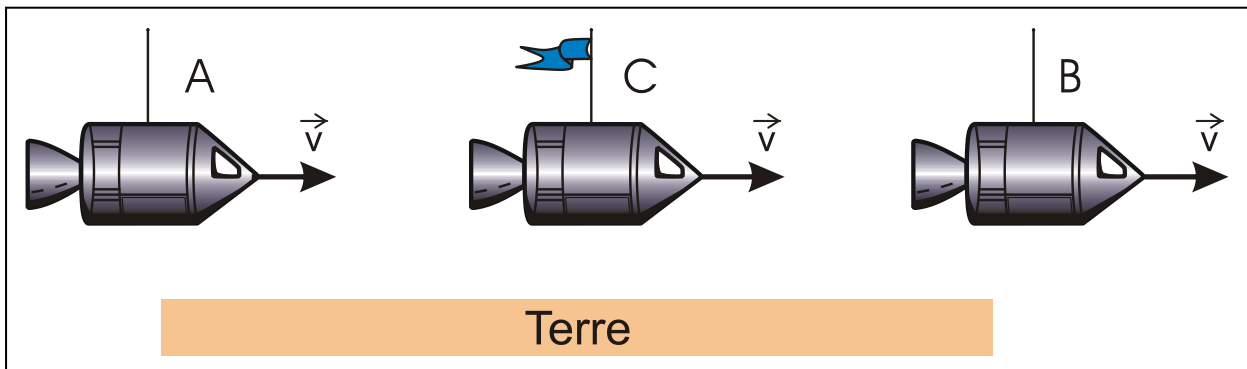


C. Physique moderne

Relativité restreinte d'Einstein

Petites questions de compréhension

- 1) Énoncez les deux postulats de la relativité restreinte.
- 2) 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.
- 3) Pourquoi les effets de la dilatation du temps ne sont-ils pas aisément observables dans la vie de tous les jours?
- 4) 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.

(Albert Einstein: "Die Unterscheidung zwischen Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft ist nur eine Täuschung, wenn auch eine hartnäckige.")

- 5) 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?
- 6) 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.
- 7) Pourquoi n'est-il pas possible pour un électron ou un proton de voyager à la vitesse de la lumière?
- 8) A quelle condition, l'équation $p = E/c$ est-elle valable pour un électron ou un proton?

Problème 1 : Durée de passage d'un train

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

Quel est sa vitesse?

Quel temps met-il pour passer devant un arbre

- a) dans le référentiel lié au sol;
- b) dans le référentiel du train?

($0,6 \cdot c$; $4,44 \cdot 10^{-7}$ s; $5,56 \cdot 10^{-7}$ s)

Problème 2 : Retardement 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 elle est au repos ?

($0,866 \times c$)

Problème 3 : Electron en mouvement rapide

Un électron se déplace à $0,998c$.

Trouvez son énergie cinétique et sa quantité de mouvement.

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

Problème 4 : Energie acquise par un électron

Calculez l'énergie nécessaire pour accélérer un électron de

- a) $0,6c$ à $0,8c$;
- b) $0,995c$ à $0,998c$?

(0,213 MeV; 2,97 MeV)

Problème 5 : Diminution de la masse du Soleil

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

De combien sa masse décroît-elle en une seconde? ($4,33 \cdot 10^9$ kg)

Problème 6 : 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? ($2,07 \cdot 10^5$ V)
- b) Avec la différence de potentiel calculée en a) et si on tient compte des effets relativistes, quelle vitesse atteindrait l'électron? ($0,703 \cdot c$)

Problème 7 : 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) Calculez la longueur du tube dans le référentiel de l'électron? (0,1635 m)
- b) Combien de temps lui faut-il pour parcourir la distance calculée en a) dans son référentiel; dans un référentiel liée au tube? ($5,45 \cdot 10^{-10}$ s; $1,07 \cdot 10^{-5}$ s)

Dualité Onde-Corpuscule

Exercice 1 : Effet photoélectrique

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

- a) Calculer la fréquence seuil et la longueur d'onde seuil du zinc.
- b) On éclaire le zinc par une radiation UV de longueur d'onde 0,25 μm . Calculer l'énergie cinétique maximale de sortie des électrons et leur vitesse.
- 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 μm . Un effet photoélectrique est-il observé ?

$$(f_s = 7,68 \cdot 10^{14} \text{ Hz} ; \lambda_s = 376 \text{ nm} ; E_c = 1,66 \text{ eV} ; v = 0,0025c)$$

Exercice 2 : Longueur d'onde associée à une particule

- a) Un ballon de football de 500g se déplace avec une vitesse de 54 km/h. Déterminer la longueur d'onde associée à ce ballon et en conclure qu'il est impossible de diffracter des corps macroscopiques. ($6,62 \cdot 10^{-35} \text{ m}$)
- b) Un électron possède une énergie 1 GeV. Déterminer la longueur d'onde associée à cet électron. Peut-il être diffracté ? ($1,24 \cdot 10^{-15} \text{ m}$)

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

Atome de Bohr

Problème 1 : Premier postulat de Bohr

En mécanique ondulatoire, la dualité corpuscule $\Leftrightarrow$ onde entraîne qu'à toute particule de quantité de mouvement $p = mv$ peut être associée une onde de longueur d'onde λ telle que

$$p = \frac{h}{\lambda}$$

- Combiner cette formule avec le 1^{er} postulat de Bohr pour en déduire une relation entre le périmètre de l'orbite électronique et la longueur d'onde associée à l'électron.
- Quelle expérience concernant les ondes mécaniques a fourni une relation semblable ?
($2\pi r_n = n\lambda$)

Problème 2 : Formule de Balmer-Rydberg

- Rappeler la formule empirique de Balmer et en déduire le niveau énergétique sur lequel aboutit un atome H qui, en se désexcitant, émet de la lumière visible.
- En utilisant l'expression fondamentale de l'énergie de l'atome H et l'énergie du photon émis ou absorbé, montrer que $\frac{1}{\lambda} = R_H \left| \frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right|$ ou R_H est une constante pouvant être calculée à partir d'autres constantes plus fondamentales. Calculer la valeur numérique de R_H à l'aide des valeurs données dans la table officielle des constantes physiques.

$$(n_f = 2 ; R_H = \frac{me^4}{8\varepsilon_0^2 h^3 c} = 1,097 \cdot 10^7 \text{ m}^{-1})$$

Problème 3 : Modèle de Bohr

- Dessiner à l'échelle les couches K, L, M et N d'un atome H. Ajouter sur cette figure les flèches correspondant aux séries de Lyman, Balmer et Paschen.
- Sur un diagramme énergétique, représenter par des flèches quelques transitions électroniques aboutissant sur la couche K (série de Lyman), sur la couche L (série de Balmer) et sur la couche M (série de Paschen). 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 dans le domaine visible du spectre de la lumière. Raisonner sans calcul numérique.
(Lyman $\rightarrow$ UV ; Paschen $\rightarrow$ IR)

Problème 4 :

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 ? (821 nm)

Problème 5 : Le spectre de l'hydrogène

L'énergie de l'atome d'hydrogène est donnée par $E_n = \frac{E_0}{n^2}$, avec $E_0 = -13,6 \text{ eV}$.

- a) Expliquez la signification des symboles E_0 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 1283 nm .
- A quelle partie du spectre électromagnétique appartient cette radiation ? (IR)
- Calculez le nombre n du niveau supérieur. ($n = 5$)

Problème 6 :

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)

Réactions nucléaires : radioactivité et fission

Constantes pour calcul précis :

1 uma : $1u = 1,6605402 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$

Electron : $m_e = 0,000\,510\,999 \text{ u}$

Neutron : $m_n = 1,008\,664\,923 \text{ u}$

Proton : $m_p = 1,007\,276\,466 \text{ u}$

Alpha: $m_\alpha = 4,001\,506\,174 \text{ u}$

Les autres masses nucléaires se déduisent des masses atomiques moins Z masses d'électrons

Lien : http://ie.lbl.gov/mass/1993AWMass_1.pdf page 22

Problème 1 : 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 première désintégration s'accompagne d'une autre émission dangereuse pour l'organisme humain. Préciser de quelle émission il s'agit et indiquer brièvement sa cause.

Problème 2 : Désintégration du carbone 14

Le carbone, émetteur β^- , de demi-vie 5 730 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 ?
(16 305y)

Problème 3 : 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 à un noyau d'atome de xénon, à un noyau d'atome de strontium et libère deux neutrons.

1. Le noyau de xénon formé ayant un nombre de masse de 139, écrire l'équation bilan de cette réaction de fission en précisant le nombre de masse du noyau de strontium formé.
2. En utilisant les données du tableau ci-dessous, expliquer pourquoi cette réaction est exoénergétique et calculer l'énergie libérée par la fission d'un noyau d'uranium 235.

^A_ZX	^{235}U	^{95}Sr	^{139}Xe	n
m en u	234,968 5	94,888 6	138,874 7	1,008 7

Les masses nucléaires sont exprimées en unité de masse atomique u.

3. Calculer l'énergie libérée par la fission totale d'un kilogramme d'uranium 235.
4. Après plusieurs désintégrations de type β^- , les produits primaires de fission aboutissent respectivement à deux nucléides stables : le lanthane et le molybdène. 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 ?

(183 MeV ; $4,69 \cdot 10^{26}$ MeV)

Variante 2 :

Les énergies de liaison par nucléon des deux noyaux sont respectivement : 7,7 MeV pour l'uranium, 8,4 MeV pour le xénon, 8,7 MeV pour le strontium.

1. Montrer que cette réaction est exoénergétique et calculer l'énergie libérée par la fission d'un noyau et d'un kilogramme d'uranium 235. ($E_{\text{noy}} = 181 \text{ MeV}$; $E_{1\text{kg}} = 4,73 \cdot 10^{26} \text{ MeV} = 75,8 \text{ TJ}$)
2. Calculer l'énergie libérée par la fission totale d'un kilogramme d'uranium 235.

Simulation et exemples de fission : <http://gilbert.gastebois.pagesperso-orange.fr/java/fission/fission.htm>

Problème 4 : Réaction de fusion

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

deutérium + deutérium $\rightarrow$ hélium 3 + neutron,

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 formation d'un noyau d'hélium 4 à partir du deutérium et pour 1 kg de deutérium subissant la fusion.

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.

($E_{1\text{kg}} = 2,14 \cdot 10^{27} \text{ MeV} = 343 \text{ TJ}$)

Pour comparer: enthalpies de combustions : essence : 47,3 MJ/kg ; dihydrogène : 142 MJ/kg

Problème 5 : 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 :

Noyau	Masse nucléaires (en u)
Po	209,914 6
Pb	205,907 7
He	4,001 5

La demi-vie du nucléide polonium 210 est de 138 jours

3. Que signifie cette affirmation ?
4. Calculer la masse de polonium 210 restant au bout de 414 jours dans un échantillon qui en contenait initialement 20g.

(5,03 MeV ; 2,5g)

Problème 6 : 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.

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?

(4.47 MeV ; $1,47 \cdot 10^7$ m/s $< c/10 \rightarrow$ particule classique)