

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) 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?
- 5) 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.
- 6) Pourquoi n'est-il pas possible pour un électron ou un proton de voyager à la vitesse de la lumière?
- 7) 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?

$$(0,6 \cdot c; \Delta t_{\text{propre}} = 4,44 \cdot 10^{-7} \text{ s}; \Delta t_{\text{impropre}} = 5,56 \cdot 10^{-7} \text{ s})$$

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? (2,07·10⁵ 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·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
 - 1. dans son référentiel
 - 2. dans un référentiel lié au tube? ($\Delta t_{\text{propre}} = 5,45 \cdot 10^{-10}$ s; $\Delta t_{\text{impropre}} = 1,07 \cdot 10^{-5}$ s)

Problème 8 :

Exercice C8 : La particule élémentaire : pion

Toutes les particules élémentaires instables, produites soit en haute atmosphère soit en laboratoire, se désintègrent spontanément pour donner d'autres particules.

Elles suivent donc une loi de désintégration à décroissance exponentielle, définie par leur demi-vie dans un référentiel où les particules se trouvent au repos ($T_{1/2} = T_0$).

Le pion π^0 est un méson (particule hadronique composée de deux quarks) sans charge, qui se désintègre en donnant deux photons (radiation électromagnétique) avec une demi-vie d'environ $0,58 \cdot 10^{-16}$ s.

a) Qu'est-ce que cette demi-vie nous indique ?

b) Si un tel méson π^0 était produit dans le noyau d'un atome (prendre 10^{-10} m pour valeur du diamètre de l'atome), quelle devrait être sa vitesse minimale pour qu'il puisse quitter son atome d'origine pendant sa demi-vie ?

c) Quelle doit être sa vitesse pour parcourir 10^{-5} m et quelle pour parcourir 1 m ?

d) La vitesse nécessaire à parcourir pendant sa demi-vie une distance de 1 nm, puis de 10 nm (taille de fabrication des dispositifs à semi-conducteur depuis 2017) ou même 1 μm (taille d'une bactérie), serait-elle relativiste ou non ?

Remarque : Pour des questions b), c) et d) de même type de calcul, développer le calcul nécessaire, puis répondre par un tableau de réponse)

$\Delta x = L_{\text{repos}}$ (en m)	v/c	v/c ; particule	v (en m/s)
b) $\frac{1}{2} \cdot 10^{-10}$	0,29%	<10% ; classique	$8,621 \cdot 10^5$
d) 10^{-9}	5,74%	<10% ; classique	$1,721 \cdot 10^7$
d) 10^{-8}	49,85%	>10% ; relativiste	$1,495 \cdot 10^8$
d) 10^{-6}	99,98%	>10% ; relativiste	$2,997 \cdot 10^8$
c) 10^{-5}	>99,999%	>10% ; relativiste	$\approx c = 2,997 \cdot 10^8$
c) 1	>99,999%	>10% ; relativiste	$\approx c = 2,997 \cdot 10^8$

Dualité Onde-Corpuscule

Exercice 1 : Effet photoélectrique

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

- Calculer la fréquence seuil et la longueur d'onde seuil du zinc.
- 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.
- 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

- 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. ($8,83 \cdot 10^{-35} \text{ m}$)
- Dans expérience de Davisson et Germer pour étudier la nature ondulatoire de particules matérielles, des électrons ont été accélérés sous une tension de 54 V. Déterminer la longueur d'onde λ associée à ces électrons. Peuvent-ils être diffractés ? Motiver la réponse !

$$(\lambda = 1,67 \cdot 10^{-10} \text{ m} \approx \text{taille d'un atome} \Rightarrow \text{diffraction possible})$$

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.

- Combien de photons sont émis pendant une impulsion ? ($N=5,24 \cdot 10^{16}$)
- Quelle est la quantité de mouvement l'ensemble de tous les photons. ($p=5,00 \cdot 10^{-11} \text{ kg m/s}$)

Réactions nucléaires : radioactivité et fission

Constantes pour calcul précis :

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

Electron : $m_e = 0,000\ 548\ 580$ u

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

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

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

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

Lien : http://physik.diekirch.org/1er/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 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 ?

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

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.

$\begin{matrix} A \\ Z \\ X \end{matrix}$	^{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. (183 MeV)

Problème 3' : Variante à l'aide des énergies de liaison

Lors d'une réaction fission un noyau U235 absorbe un neutron et donne naissance au noyau Xe139, au noyau Sr95 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 et d'un kilogramme d'uranium 235.
2. Calculer l'énergie libérée par la fission totale d'un kilogramme d'uranium 235.
3. 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 ?

$$(E_{1\text{U}}=181\text{MeV} ; E_{1\text{kg}} = 4,73 \cdot 10^{26} \text{ MeV} = 75,8 \text{ TJ})$$

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)

Etats énergétiques quantifiés

Exercice 1 : Le spectre de l'hydrogène

L'énergie de l'atome d'hydrogène est donnée par $E_n = \frac{E_1}{n^2}$, avec $E_1 = -13,6$ 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 $-2,42 \cdot 10^{-19}$ J. (vrai)
 2. L'atome d'hydrogène peut avoir une énergie égale à $-2,8$ 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 2 : 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 :
 $n = 2 \rightarrow n = 1$, $n = 4 \rightarrow n = 1$ et $n = 3 \rightarrow n = 2$

Exercice 3 : 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 ?

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

Exercice 4 : Interaction avec un proton

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.

- Peut-il ioniser l'atome H se trouvant dans l'état fondamental ?
- Peut-il ioniser l'atome H se trouvant dans le premier état excité ?
- 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 5 :

Le 24 janvier 2009, un laboratoire de physique nucléaire a reçu 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.

