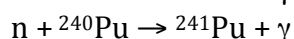
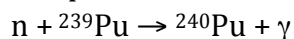
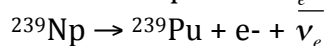
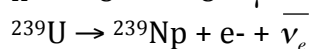
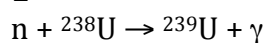


ENSMP 29 Avril 2011

CORRIGÉ DE L'EXAMEN DE PHYSIQUE NOYAUX ET RADIOACTIVITÉ

I - Les neutrinos au service de la paix

1 -



Les neutrons proviennent des fissions.

2 - La réaction en chaîne ne peut se produire que si les neutrons ne sont pas absorbés par ${}^{238}\text{U}$, ou perdus en s'échappant du cœur fissile. La séparation de deux isotopes est difficile car ils ont les mêmes propriétés chimiques.

D'après les formules de la question précédente, le ${}^{239}\text{Pu}$ est produit par un seul neutron, tandis que le ${}^{241}\text{Pu}$ nécessite trois réactions successives impliquant des neutrons. La première courbe démarre donc linéairement, tandis que la deuxième est de degré trois à l'origine.

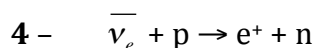
Il n'y a pas de plutonium à l'origine dans le REP. Donc, si l'on choisit de l'arrêter après moins de 500 jours, la proportion de plutonium fissile sera de l'ordre de 90%.

3 - Un REP fictif de 1 GW produit $10^9 / (1,602 \times 10^{-19} \times 10^6 Q)$ fissions par seconde. Chaque fission produit N antineutrinos.

Numériquement, on a pour ${}^{235}\text{U}$: $6,19 \times 10^{19}$; ${}^{239}\text{Pu}$: $4,55 \times 10^{19}$ antineutrinos par seconde.

Ces nombres sont suffisamment différents pour que la mesure de la puissance et du flux d'antineutrinos permette de connaître la proportion d'uranium et de plutonium dans le REP. Si cette proportion remonte à la valeur de l'uranium pur, cela indique que, pendant l'arrêt, du plutonium a été extrait.

Les antineutrinos sont stoppés avec une probabilité négligeable par l'enceinte du réacteur, contrairement aux neutrons. L'information est donc infalsifiable.



Le positron s'annihile dans le liquide du détecteur en donnant deux γ de 511 keV, comme dans une caméra positron. La capture du neutron est détectée par une radioactivité γ , ce qui renforce la sélectivité de la détection par rapport au bruit de fond.

La probabilité d'interaction d'un antineutrino entrant dans un détecteur de volume V , d'épaisseur L est $p = (P/V) \sigma L$

V / L est l'aire du détecteur. Les antineutrinos sont émis isotropiquement dans tout l'espace. La proportion de ceux qui entrent dans le détecteur est donc $(V / L) / (4 \pi D^2)$. La probabilité de détection est donc : $p' = p (V / L) / (4 \pi D^2) = P \sigma / (4 \pi D^2)$.

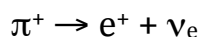
Pour connaître le nombre d'antineutrinos détectés par jour, il faut multiplier par l'efficacité 10%, par 3600×24 , et par les nombres d'antineutrinos émis par seconde, calculés à la question précédente : $10^9 N / (1,602 \times 10^{-19} \times 10^6 Q)$

Application numérique : 218 pour ^{235}U , 138 pour ^{239}Pu .

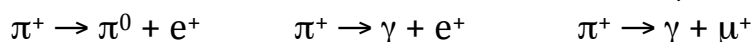
II - Désintégration des pions

1 - Les neutrinos sont des leptons : ils ne sont pas sensibles à l'interaction forte. N'étant pas chargés, ils sont insensibles à l'interaction électromagnétique. Ils ne sont sensibles qu'à l'interaction faible, qui est donc la cause de la désintégration.

Les seules particules plus légères que le pion chargé sont le π^0 , le muon, l'électron, les neutrinos et le photon. Il faut conserver la charge électrique et la charge leptonique (muonique ou électronique). On a donc :



Les réactions à deux corps faisant intervenir le π^0 ou le γ seraient :



Mais elles ne conservent pas le nombre leptonique. On a donc bien une seule désintégration possible à deux corps.

Le π^- étant l'antiparticule du π^+ , il possède la même durée de vie et sa désintégration préférentielle est obtenue avec les antiparticules du μ^+ et du ν_μ : $\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$

Il a aussi : $\pi^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e$

2 - L'énergie E est : $E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$.

On en déduit : $\frac{v}{c} = \sqrt{1 - \left(\frac{mc^2}{E}\right)^2}$

Avec les valeurs numériques des masses : $v/c = 0,9902$ pour le π^+ et $0,9944$ pour le μ^+

La distance parcourue est : $l = \frac{cT}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$ où T est la durée de vie.

Pour les μ^+ : $l = 6237$ m ; pour les π^+ : $l = 55,95$ m. Les pions chargés produits vers 10 km d'altitude n'ont aucune chance d'arriver au sol, avant de se désintégrer en muons. Ces derniers peuvent y arriver, car leur probabilité de parcourir plus de 10 km est de l'ordre de : $\exp(-10000 / 6237) = 0,375$.

Les protons, qui ont durée de vie infinie, n'atteignent pas le sol car leur section efficace d'interaction avec les noyaux de l'air est élevée. La propriété qui permet aux muons d'atteindre le sol est donc leur insensibilité à l'interaction forte¹.

¹ On n'a pas tenu compte du fait que les muons perdent une partie de leur énergie par ionisation au cours de leur trajet dans l'atmosphère, en raison de l'interaction électromagnétique.

3 – Le photon est le vecteur de l'interaction électromagnétique. C'est cette interaction qui est responsable de la désintégration du π^0 . La durée de vie est beaucoup plus courte que les désintégrations des pions chargés, car l'interaction électromagnétique est plus forte que l'interaction faible.

C^2 est l'identité, donc $a = +1$ ou -1 . Le π^0 et le γ étant chacun leur propre antiparticule, on a donc $C|\pi^0\rangle = a|\pi^0\rangle$ et $C|\gamma\rangle = a|\gamma\rangle$

Lorsque la charge électrique est inversée, les vecteurs \vec{E} et \vec{B} sont transformés en $-\vec{E}$ et $-\vec{B}$. On en conclut que $a = -1$ pour le photon.

Dans la réaction (1), on applique C aux deux photons finals, la valeur de a est donc $+1$. Cette valeur est aussi celle du π^0 , puisque la désintégration est due à l'interaction électromagnétique qui conserve C .

Dans la réaction $\pi^0 \rightarrow \gamma \gamma \gamma$, qui est elle aussi électromagnétique, on aurait $a = +1$ dans l'état initial, $a = -1$ dans l'état final. C'est donc une réaction interdite.