

Examen de Relativité, noyaux et particules
Mercredi 22 janvier 2014
Durée de l'épreuve : 3h

Documents autorisés : PDG booklet, l'article « The Positive Electron »
Le schéma indicatif du modèle en couches est donné en fin de sujet.
Tout autre document est interdit.

L'utilisation d'une calculatrice « raisonnable » est autorisée.
Les téléphones portables ne sont pas autorisés.

5 pages imprimées.

Durée approximative :

Ex. I : 15 min.	Ex. II : 25 min.
Ex. III : 20 min.	Ex. IV : 30 min.
Ex. V : 40 min.	Ex. VI : 50 min.

Exercice I

Questions de cours

Répondre de manière courte et synthétique aux questions suivantes :

1. Tracer le diagramme de Feynman de la désintégration du muon, et faire tout commentaire qui semble utile sur la masse du boson W qui y intervient. Quel est le lien entre cette masse et le temps de vie du muon ?
2. Expliquer brièvement l'expérience réalisée en 1932 par Chadwick, qui a permis d'établir l'existence du neutron.

Exercice II

Processus permis et interdits

Pour chacune des interactions suivantes en déterminer le caractère permis ou interdit. Pour les interactions interdites, expliquer pourquoi. Pour les interactions permises, indiquer celle qui est dominante et tracer le diagramme de Feynman correspondant.

1. $B^0 \rightarrow D^{*-} D^0 K^+$
2. $\tau^+ n \rightarrow \bar{\nu}_\tau \Delta^0 p$
3. $\pi^+ p \rightarrow K^+ \Sigma^+$
4. $\pi^+ e^- \rightarrow \bar{\nu}_e \mu^+ \nu_\mu$
5. $B^+ \rightarrow K^+ \pi^0$

Pour les réactions 4. et 5., si elles sont permises, donner deux possibilités de diagrammes de Feynman.

Exercice III

Questions sur l'article « The Positive Electron »

1. Expliquer brièvement le dispositif expérimental et la logique de l'expérience.
2. Discuter la géométrie de la chambre de Wilson utilisée. Comment celle-ci intervient dans la conclusion de l'article ?
3. Expliquer et commenter le point de vue de l'article sur la structure du noyau atomique et la source des positrons. Qu'est ce qu'un « negatron » ?

Exercice IV

Modèle en couches

1. Discuter une suite d'observables conduisant à l'existence de nombres dit magiques dans la structure nucléaire.
2. Décrire brièvement le modèle en couches des noyaux en insistant sur l'importance du couplage spin-orbite.
3. En utilisant le modèle en couches, déterminer, quand cela est possible, le spin et la parité de l'état fondamental des noyaux suivants :

$$\text{a) } {}_{20}^{41}\text{Ca} \quad \text{b) } {}_{20}^{42}\text{Ca} \quad \text{c) } {}_{21}^{41}\text{Sc} \quad \text{d) } {}_{21}^{42}\text{Sc}$$

Lorsque plusieurs valeurs de spin et de parité sont possibles, donner les toutes, en expliquant.

4. Les caractéristiques spin-parité J^P et l'énergie d'excitation des deux premiers états excités du ${}_{21}^{41}\text{Sc}$ sont :

$$E_1 = 1,72 \text{ MeV}; J^P = \frac{3}{2}^- \quad E_2 = 2,10 \text{ MeV}; J^P = \frac{3}{2}^+$$

- a) Interpréter ces caractéristiques dans le cadre du modèle en couches.
 - b) En utilisant vos connaissances sur le couplage spin-orbite, pouvez-vous donner les caractéristiques spin-parité J^P et l'énergie d'excitation du (d'un) prochain état excité.
5. Le premier état excité du ${}_{21}^{42}\text{Sc}$ est a une énergie d'excitation de 0,6 MeV par rapport au fondamental de ce noyau, tandis que celui du ${}_{20}^{40}\text{Ca}$ a une énergie d'excitation de 3,3 MeV. Comment peut-on expliquer une telle différence ?

Exercice V

Section efficace de deux processus de diffusion leptonique

efficace de particules de spin 1/2.

1. Dessiner les diagrammes de Feynman pour la diffusion élastique $e^- \mu^-$ et pour le processus $e^+ e^- \rightarrow \mu^- \mu^+$.
2. Pour la diffusion $e^- \mu^-$, calculer l'élément de matrice \mathcal{M}_1 en fonction des variables de Mandelstam s , u et t .
3. Expliquer l'interprétation de Feynman des solutions d'énergie négative de l'équation de Klein-Gordon.

- En exploitant cette interprétation, déduire de \mathcal{M}_1 l'élément de matrice pour $e^+e^- \rightarrow \mu^-\mu^+$ avec un minimum de calculs. On l'exprimera en fonction des variables de Mandelstam s , u et t sans les calculer. Expliquer votre démarche.
- Toujours en exploitant le lien entre les deux réactions calculer dans les deux cas s , u et t dans la limite ultra-relativiste en fonction de l'impulsion de l'électron dans le centre de masse de la réaction et l'angle θ entre le μ^- et e^- .
- Calculer la section efficace différentielle à l'aide de l'expression : *pour la diffusion ($e^-\mu^- \rightarrow e^-\mu^-$)*

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{1}{64\pi^2 s} \frac{|\vec{p}_f^*|}{|\vec{p}_i^*|} |\mathcal{M}|^2$$

en fonction de s et de θ .

- En raisonnant qualitativement, expliquer quelle différence pourrait-il y avoir entre les vraies sections efficaces et celles obtenues dans cet exercice.

Exercice VI

L'état X(3872)

L'état exotique X(3872), a été découvert par l'expérience Belle en 2003 dans le canal de désintégration $J/\psi \pi^+ \pi^-$. Depuis sa découverte d'autres expériences ont confirmé son existence, et les physiciens s'interrogent par rapport à sa nature en cherchant à déterminer ses propriétés et ses nombres quantiques.

- Un spectre publié par l'expérience LHCb en 2013 est montré sur la figure 1. Il présente un pic clair correspondant au X(3872). Expliquer brièvement l'ensemble de cette figure (on pourra utiliser des chiffres pertinents du PDG). Estimer la masse et la largeur du X(3872).

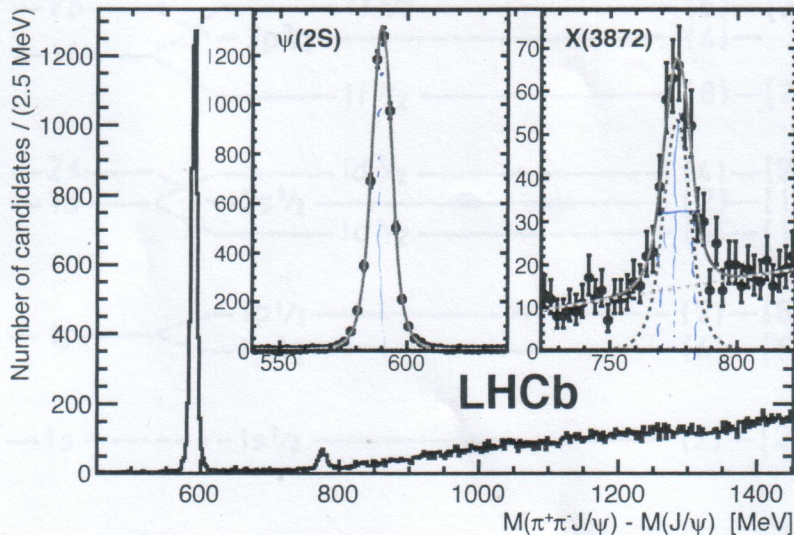


FIGURE 1 – Spectre de la variable $M(J/\psi \pi^+ \pi^-) - M(J/\psi)$ publié en 2013 par l'expérience LHCb. Le pic correspondant au X(3872) est clairement visible. Il est agrandi en haut à droite. Le pic en ligne pointillée montre la composante signal.

2. Donner tous les arguments pertinents pour montrer que la désintégration $X(3872) \rightarrow J/\psi \pi^+ \pi^-$ se fait par interaction forte. Donner, en expliquant, tous les nombres quantiques additifs (charge électrique, nombre baryonique, nombres de saveur...) du $X(3872)$.
 3. Tracer le diagramme de Feynman de la désintégration en supposant qu'il s'agit d'un état $c\bar{c}$.
 4. Toujours avec l'hypothèse que le $X(3872)$ est un état $c\bar{c}$, quel est son isospin ? Déterminer le rapport de ses rapports de branchement en $J/\psi \pi^+ \pi^-$ et en $J/\psi \pi^0 \pi^0$. Expliquer la démarche.
- Il existe plusieurs indications que le $X(3872)$ n'est pas compatible avec un état simple du modèle des quarks. Il pourrait s'agir d'une molécule de deux mésons de type $c\bar{q}$ (où q est un quark u , d ou s), ou bien d'un état lié $c\bar{c}q\bar{q}$, dit tetraquark. Afin de déterminer la nature du $X(3872)$, la mesure de ses nombres quantiques de spin, parité et conjugaison de charge est nécessaire.
5. Sachant que la désintégration $X(3872) \rightarrow J/\psi \gamma$ a été observée, déterminer le nombre quantique C (état propre de la conjugaison de charge) de cet état. Expliquer la démarche.
 6. On revient à la désintégration $X(3872) \rightarrow J/\psi \pi^+ \pi^-$. En utilisant la conservation de la conjugaison de charge (et les données du PDG), montrer que si la paire $\pi^+ \pi^-$ provient d'une résonance il peut s'agir *seulement* du $\rho^0(770)$ ou du $\omega(782)$. Pourquoi peut-on négliger la contribution de la résonance $\omega(782)$?
 7. En réalité, les distributions angulaires des deux pions excluent un état $J = 1$. Expliquer pourquoi cette observation mène à la conclusion que le π^+ et le π^- ne viennent pas d'une résonance (on dit que leur état est non-résonant).
 8. On considère le moment cinétique total J de cet état $\pi^+ \pi^-$ non-résonant comme 0, 2 ou 3. Pour chacune de ces valeurs de J déterminer la parité de l'état $\pi^+ \pi^-$.
 9. Pour les trois valeurs de J , déterminer aussi le nombre quantique C de l'état $\pi^+ \pi^-$. Est-ce compatible avec les réponses aux questions précédentes ? Conclusion.
 10. Avec l'ensemble des nombres quantiques obtenus, déterminer toutes les possibilités pour J et C du $X(3872)$.

