

Physique nucléaire et des particules - MP054
Examen Session 1
Mardi 26 Avril 2011

Durée : 3h00

Une calculatrice "raisonnable" et le PDG booklet sont autorisés.

Les téléphones portables ne sont pas autorisés.

Le schéma indicatif du modèle en couches et les coefficients de Clebsch-Gordan sont donnés en fin de sujet.

9 pages imprimées.

Les questions sont très largement indépendantes.

Durée approximative :

Pb. I : 1 heure Pb. II : 2 heures

Problème n° 1 : Autour du Nickel

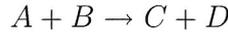
1. Donner quelques arguments qui ont conduit au modèle en couches nucléaire.
2. Les énergies, les spins et les parités du fondamental et des premiers états excités du noyau de ${}^{59}_{28}\text{Ni}$ sont :
($E = 0 \text{ MeV}$, $J^P = \frac{3}{2}^-$), ($E = 0,339 \text{ MeV}$, $J^P = \frac{5}{2}^-$), ($E = 0,465 \text{ MeV}$, $J^P = \frac{1}{2}^-$)
 - (a) Interpréter ces caractéristiques dans le cadre du modèle en couches et écrire les configurations associées.
 - (b) Ecrire le terme de l'hamiltonien nucléaire responsable de la différence d'énergie entre l'état fondamental et le deuxième état excité, puis donner une estimation numérique de la constante qui intervient.
3. On va étudier le noyau de nickel ${}^{55}_{28}\text{Ni}$
 - (a) Donner le moment angulaire total et la parité de l'état fondamental du noyau de nickel ${}^{55}_{28}\text{Ni}$ et du noyau de Cobalt ${}^{55}_{27}\text{Co}$ en utilisant le modèle en couches. Ce résultat est-il surprenant ?
 - (b) Quelle est l'origine de la différence entre les énergies de liaison de ces deux noyaux ?
En considérant que l'énergie d'interaction coulombienne est définie par $H_c = \frac{3}{5}\alpha\hbar c \frac{Z(Z-1)}{R}$ avec $R = r_0 A^{1/3}$, $\alpha = \frac{1}{137}$, $\hbar c = 197 \text{ MeV}\cdot\text{fm}$, donner la différence de masse nucléaire entre ces deux noyaux $\Delta Mc^2 = M({}^{55}_{28}\text{Ni}) - M({}^{55}_{27}\text{Co})$.
Faire une estimation numérique de ΔMc^2 .
4. L'état excité d'énergie 2882 keV et de spin-parité $J^P = \frac{11}{2}^-$ du noyau de ${}^{55}_{28}\text{Ni}$ forme un doublet d'isospin avec un état excité du noyau de ${}^{55}_{27}\text{Co}$.
 - (a) Donner le spin ainsi que la parité de cet état excité du noyau de ${}^{55}_{27}\text{Co}$.
 - (b) Donner l'isospin et la troisième composante de celui-ci pour chaque état de ce doublet d'isospin.

- (c) Cet état excité du noyau de ${}^{55}_{27}\text{Co}$ se désexcite sur l'état fondamental du noyau de ${}^{55}_{27}\text{Co}$ par émission d'un photon de 2974 keV. Estimer numériquement la différence entre les énergies coulombiennes d'interaction des deux états excités : $\Delta B = B({}^{55}_{28}\text{Ni}^*) - B({}^{55}_{27}\text{Co}^*)$
5. Les énergies (données en MeV), les spins et les parités du fondamental et de certains états excités du noyau de ${}^{55}_{28}\text{Ni}$ sont :
- $(E = 0, J^P = \frac{7}{2}^-)$ $(E = 2,88, J^P = \frac{11}{2}^-)$ $(E = 3,58, J^P = \frac{13}{2}^-)$ $(E = 3,62, J^P = \frac{15}{2}^-)$
 $(E = 4,48, J^P = \frac{17}{2}^-)$
- (a) Déterminer la multipolarité des transitions les plus probables pour la désexcitation des états excités du ${}^{55}_{28}\text{Ni}$.
- (b) Le ${}^{55}_{28}\text{Ni}$ peut être produit via la réaction ${}^{28}_{14}\text{Si}({}^{36}_{18}\text{Ar}, 2\alpha x){}^{55}_{28}\text{Ni}^*$. Ecrire la réaction et déterminer la particule x .
- (c) En utilisant la figure 1 que vous commenterez, vérifier vos résultats déterminés à la question (5a) aux observations en argumentant.
- (d) Cette séquence de niveaux excités se retrouve-t-elle dans les niveaux excités du ${}^{55}_{27}\text{Co}$?
6. On rappelle que les énergies (données en MeV), les spins et les parités du fondamental et de certains états excités du noyau de ${}^{55}_{28}\text{Ni}$ sont :
- $(E = 0, J^P = \frac{7}{2}^-)$ $(E = 2,88, J^P = \frac{11}{2}^-)$ $(E = 3,58, J^P = \frac{13}{2}^-)$
- (a) Donner le moment angulaire total et la parité de l'état fondamental du noyau de nickel ${}^{56}_{28}\text{Ni}$ en utilisant le modèle en couches.
- (b) Le premier état excité du ${}^{56}_{28}\text{Ni}$ est un état de spin-parité 2^+ situé à 2,7 MeV du fondamental de ce noyau. Quel modèle nucléaire permet de comprendre cet état ?
- (c) Quels modèles nucléaires faut-il coupler pour interpréter les états $\frac{11}{2}^-$ et $\frac{13}{2}^-$ du ${}^{55}_{28}\text{Ni}$?
7. Le noyau de ${}^{56}_{28}\text{Ni}$ est instable.
- (a) Ecrire la réaction de désintégration du ${}^{56}_{28}\text{Ni}$.
L'excès de masse du noyau ${}^{56}_{28}\text{Ni}$ vaut $\Delta({}^{56}_{28}\text{Ni}) = -53,902 \text{ MeV} = \mathcal{M} - Au$ avec $uc^2 = 931,501 \text{ MeV}$ et où \mathcal{M} est la masse atomique du ${}^{56}_{28}\text{Ni}$.
On donne $\Delta({}^{56}_{29}\text{Cu}) = -38,601 \text{ MeV}$ et $\Delta({}^{56}_{27}\text{Co}) = -56,039 \text{ MeV}$
- (b) Calculer la chaleur (bilan) de réaction Q .
- (c) Dans le cadre du modèle en couches, déterminer, si possible, le spin-parité de l'état fondamental du noyau fils de la désintégration.
- (d) L'(les) état(s) que vous venez de déterminer est(sont)-il(s) accessible(s) dans la désintégration du ${}^{56}_{28}\text{Ni}$.
8. La fonction d'onde $\Psi(j_1, j_2, J, M)$ de spin de deux particules identiques de moment angulaire total j_1 et j_2 s'écrit :
- $$\Psi(j_1, j_2, J, M) = N (\phi(j_1(1), j_2(2), J, M) + (-1)^{j_1+j_2-J} \phi(j_1(2), j_2(1), J, M))$$
- où N est un coefficient de normalisation, J la valeur réalisée du couplage des deux spins j_1 et j_2 , M la valeur propre de la troisième composante de J et $\phi(j_1(1), j_2(2), J, M)$ la fonction d'onde de spin correspondant au couplage des deux moments angulaires j_1 et j_2 .
- (a) Ecrire cette fonction d'onde dans le cas particulier où les deux particules identiques sont sur la même sous-couche $j_1 = j_2 = j$.
- (b) Quelles sont dans ce cas particulier les valeurs possibles de J ?

- (c) Application : Le noyau de ${}_{28}^{58}\text{Ni}$ a les spins-parités suivants $(0^+, 2^+, 4^+)$ pour l'état fondamental et les deux premiers états excités. En faisant l'hypothèse que cette séquence est donnée par deux particules identiques, donner le moment angulaire de la sous-couche où se trouvent les deux neutrons.

Problème n° 2 : Section efficace et $\Upsilon(4S)$

Deux bosons A et B de spin nul, de charge opposée $\pm e$ interagissent par l'échange d'un photon :



où A, B sont les particules entrantes et C, D sont les particules sortantes.

Dans le référentiel du laboratoire de cette réaction, les quadrivecteurs des particules entrantes et sortantes seront notés :

$$\mathcal{P}_A = (E_A, \vec{p}_A) \quad \mathcal{P}_B = (E_B, \vec{p}_B) \quad \mathcal{P}_C = (E_C, \vec{p}_C) \quad \mathcal{P}_D = (E_D, \vec{p}_D)$$

- Dessiner le(s) diagramme(s) de Feynman décrivant cette interaction.
- En utilisant la règle d'or de Fermi, il est possible d'exprimer la section efficace différentielle sous la forme :

$$d\sigma = \frac{|\mathcal{M}|^2}{F} d\rho$$

Expliquer brièvement la signification physique des 4 termes de cette formule et expliquer le rôle de chaque terme dans le calcul de la section efficace différentielle.

- Montrer, à très hautes énergies (à définir), les relations suivantes :
 - l'énergie \sqrt{s} dans le centre de masse est donnée par :

$$s = 4E_A E_B = 4E_C E_D$$

- les impulsions entrantes et sortantes dans le centre de masse sont égales :

$$p_i^* = p_f^* = E_A^* = E_B^* = E_C^* = E_D^*$$

- Le flux est donné, dans le cas d'une collision frontale, par $F = |\vec{v}_A - \vec{v}_B| 2E_A 2E_B$. Montrer que dans le centre de masse de la réaction, le flux est donné par :

$$F = 4p_i^* \sqrt{s}$$

où p_i^* est l'impulsion d'une particule entrante dans le centre de masse de la réaction.

- L'élément d'espace des phases est donné par :

$$d\rho = (2\pi)^4 \delta^{(4)}(\mathcal{P}_A + \mathcal{P}_B - \mathcal{P}_C - \mathcal{P}_D) \frac{d^3 \vec{p}_C}{(2\pi)^3 2E_C} \frac{d^3 \vec{p}_D}{(2\pi)^3 2E_D}$$

En injectant l'ensemble des données précédentes et en l'intégrant sur l'ensemble des états finaux accessibles, montrer que la section efficace différentielle dans le centre de masse (CM) à très haute énergie s'écrit :

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega} \right)_{CM} = \frac{1}{64\pi^2} \frac{|\mathcal{M}|^2}{s} \quad (1)$$

6. En utilisant les règles de Feynman, déterminer l'élément de matrice $|\mathcal{M}|^2$ (à très haute énergie) dans le cas où l'interaction a lieu suivant :
- une voie t
 - une voie s
 - Quel est la propriété des particules A et B pour qu'une interaction ait lieu dans la voie s ?

7. On considère la réaction :

$$e^- e^+ \longrightarrow \mu^- \mu^+$$

avec une énergie de ~ 1 à ~ 40 GeV dans le CM.

- L'approximation ultra-relativiste dans les calculs sera-t-elle justifiée? Pourquoi?
- Dessiner les diagrammes de Feynman décrivant cette interaction.
- La contribution de l'interaction faible à la section efficace est-elle négligeable dans ce domaine d'énergie? Pourquoi?
- Déterminer la section efficace totale dans l'approximation ultra-relativiste en utilisant la relation 1. Les résultats précédents pourront être utilisés. On supposera que l'ensemble des particules sont de spin nul.
- Le calcul rigoureux de QED pour des particules de spin $\frac{1}{2}$ donne le résultat suivant :

$$\sigma(e^-e^+ \rightarrow \mu^-\mu^+) = \frac{4\pi\alpha^2}{3s} \sqrt{1 - \frac{4m_\mu^2}{s}} \left(1 + \frac{2m_\mu^2}{s}\right) \xrightarrow{\sqrt{s} \gg m_\mu} \frac{4\pi\alpha^2}{3s} \quad (2)$$

Quelle est la signification physique de la racine carrée dans l'expression précédente?

8. On considère la réaction :

$$e^- e^+ \longrightarrow q \bar{q}$$

avec une énergie de ~ 1 à ~ 40 GeV dans le CM et où q est un quark d'une saveur suivante u, d, s, c ou b . L'approximation ultra-relativiste sera supposée valable.

- Comment se transforme l'expression de l'équation 2 pour la réaction $e^-e^+ \rightarrow q\bar{q}$?
- Expliquer pourquoi dans ce domaine d'énergie, on a :

$$\sigma(e^-e^+ \rightarrow \text{hadrons}) \simeq \sum_q \sigma(e^-e^+ \rightarrow q\bar{q})$$

- Déterminer le rapport R :

$$R = \frac{\sigma(e^-e^+ \rightarrow \text{hadrons})}{\sigma(e^-e^+ \rightarrow \mu^-\mu^+)}$$

dans différents domaines d'énergie que vous définirez.

- Comparer vos résultats aux observations montrées dans la figure 2b) et 2c).

9. On s'intéresse à la production du bottomonium $\Upsilon(4S)$ via la réaction $e^+e^- \rightarrow \Upsilon(4S)$. Cette particule est observable sur la figure 2c).

- Interpréter l'existence des pics sur les figures 2.
- Donner en argumentant la composition en quarks de l' $\Upsilon(4S)$.
- Dessiner le graphe de Feynman de production de l' $\Upsilon(4S)$.
- La luminosité de la machine étant de $0.5 \times 10^{31} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$, déterminer le nombre de réactions $e^-e^+ \rightarrow \Upsilon(4S)$ par jour en utilisant les données de la figure 2.

- (e) En utilisant les données de la figure 2, déterminer approximativement en expliquant la masse et la durée de vie de l' $\Upsilon(4S)$.

10. Les principaux modes de désintégration de l' $\Upsilon(4S)$ sont :

$$\Upsilon(4S) \rightarrow B^- B^+ \quad \text{et} \quad \Upsilon(4S) \rightarrow B^0 \bar{B}^0$$

- (a) Déterminer en expliquant la valeur de l'isospin et de la troisième composante de l'isospin de chaque particule. Identifier les multiplets d'isospin.
- (b) Que signifie l'expression "indépendance de charge de l'interaction forte"? Quelles en sont les conséquences sur les masses des particules membres d'un même multiplet d'isospin?
- (c) En utilisant la symétrie d'isospin de l'interaction forte, et en se restreignant à l'isospin, déterminer le rapport :

$$\frac{\sigma(\Upsilon(4S) \rightarrow B^- B^+)}{\sigma(\Upsilon(4S) \rightarrow B^0 \bar{B}^0)}$$

11. Sachant que $J^{PC}(\Upsilon(4S)) = 1^{--}$, $J^P(B^+) = J^P(B^0) = 0^-$, montrer que la parité est conservée dans la désintégration $\Upsilon(4S) \rightarrow B^- B^+$.

12. Le bottomonium $\Upsilon(4S)$ est produit au repos dans la réaction $e^+ e^- \rightarrow \Upsilon(4S)$. Sa masse est de 10.58 GeV et désintègre en une paire de mésons B . La masse des mésons B est de 5.28 GeV avec une durée de vie de $1,5 \times 10^{-12}$ s.

- (a) Déterminer la distance moyenne parcourue dans le laboratoire par les mésons B dans le cas où les faisceaux d' e^+ et d' e^- ont la même énergie dans le référentiel du laboratoire.
- (b) Cette distance étant très faible, afin de l'augmenter, l'idée est d'utiliser des faisceaux d' e^+ et d' e^- d'énergie différente. La collision est donc asymétrique dans le référentiel du laboratoire.

L' $\Upsilon(4S)$ est-il produit au repos dans le référentiel du laboratoire dans ces conditions? Quelle doit être la différence d'énergie des e^+ et des e^- dans le laboratoire afin de produire des mésons B parcourant en moyenne 0,2 millimètre dans le laboratoire? Faites les approximations que vous jugerez nécessaires.

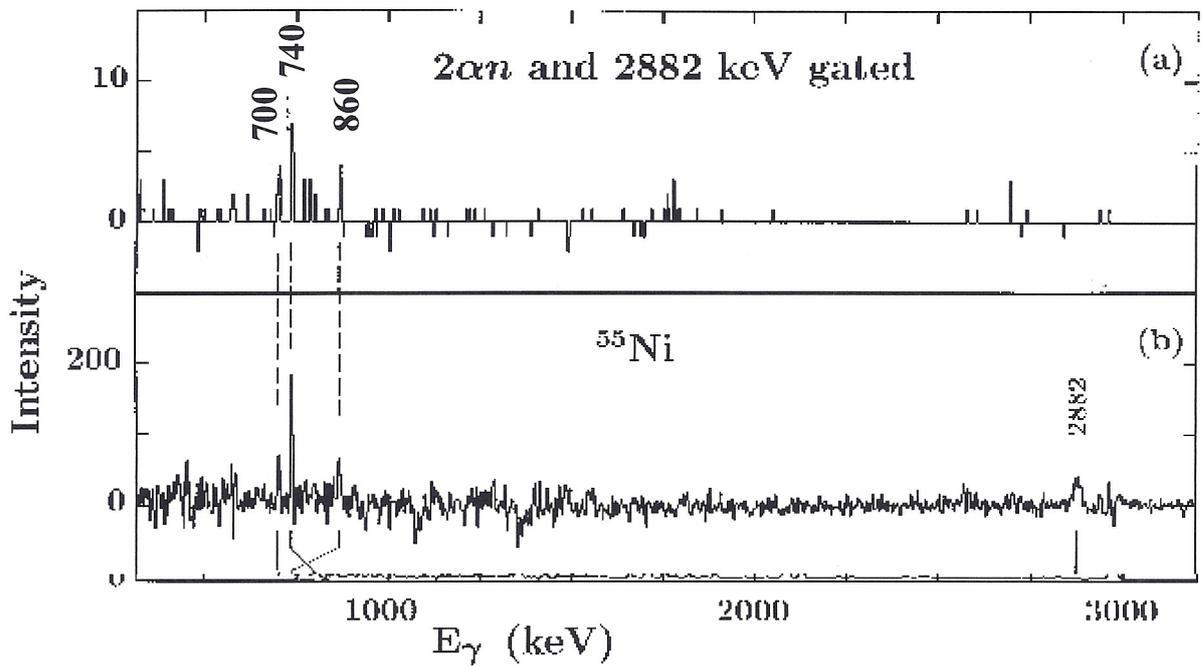


FIG. 1 – a) Spectre en énergie des gammas émis lors de la réaction $^{36}\text{Ar} + ^{28}\text{Si}$ en demandant une coïncidence entre 2 α , 1 neutron et un gamma de 2,88 MeV. b) Spectre en énergie des gammas émis lors de la réaction $^{36}\text{Ar} + ^{28}\text{Si}$. La figure provient du journal Z.Phys. A358, 379-380 (1997)

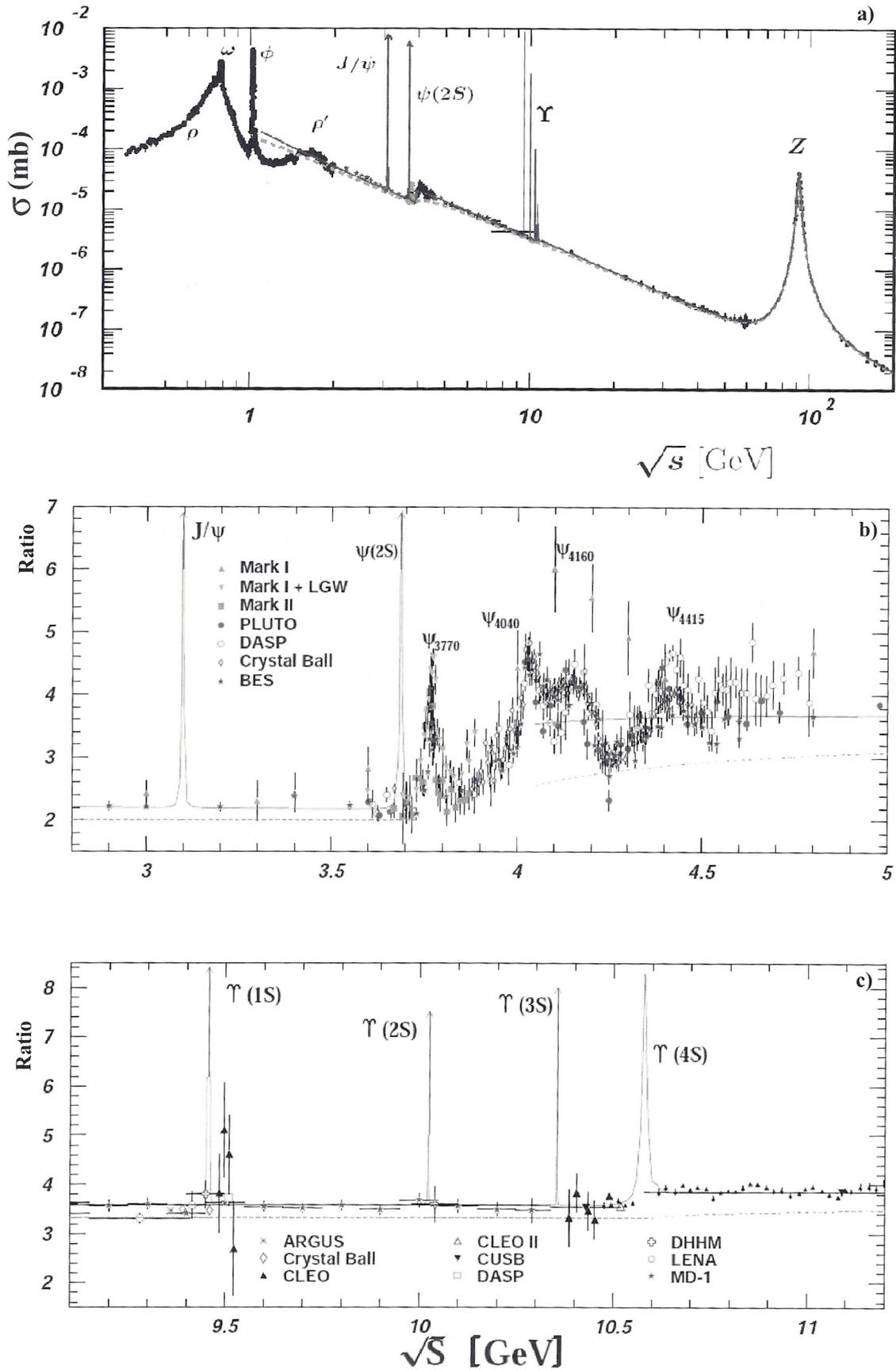


FIG. 2 – a) Section efficace totale du processus e^+e^- en fonction de l'énergie dans le centre de masse \sqrt{s} . b) et c) Valeur du rapport R en fonction de l'énergie dans le centre de masse \sqrt{s} . Les mesures de diverses expériences ainsi que les résonances sont représentées.

Problème 1: Au tour du Nickel.

①

1: Arguments pour le modèle en couches:

- Existence de Nbre magique valable indépendamment pour les neutrons et les p.
observé par

- Energie de liaison du dernier nucléon élevée
- Nbre de noyaux stables pour certaines valeurs de N et Z
- Abondance des éléments
- Section efficace d'absorption des neutrons
- Energie du 1^{er} excité élevée si magique
- Moment quadrupolaire nul.

Analogie avec les gaz rares. \Rightarrow modèle en couches.

2°) ${}_{28}^{59}\text{Ni}$: 28 p \Rightarrow contribution au spin 0⁺
30 + 1 neutrons.

a) Fondamental: 31^{er} neutrons pour $2p_{3/2}$

Etat 1: Surt sur $1f_{5/2}$

Etat 2: Surt sur $2p_{1/2}$

b) $2p_{3/2}$ et $2p_{1/2}$ liés par le couplage spin-orbite

$$H_{\text{rot}} = f(r) \vec{L} \cdot \vec{S} \quad \Rightarrow \quad \vec{L} \cdot \vec{S} = \frac{1}{2} (J^2 - L^2 - S^2)$$

$$\Rightarrow \Delta E = \frac{f(r)}{2} [J_+^2 + L^2 - S^2 - (J_-^2 - L^2 - S^2)] = \frac{f(r)}{2} (J_+^2 - J_-^2)$$

$$J_+ = l + \frac{1}{2} \quad J_- = l - \frac{1}{2} \quad \Rightarrow \quad (l + \frac{1}{2})^2 - (l - \frac{1}{2})^2 = 2l$$

4°) Si l'état $\frac{11}{2}^-$ du ^{55}Ni forme un doublet avec $\frac{13}{2}$

a) Un état du ^{55}Co , cet état a les mêmes caractéristiques par l'int. forte.

Donc cet état est aussi $\frac{11}{2}^-$

b) Doublet $I = \frac{7}{2}$ $I_3 = \frac{Z-N}{2}$

$$I_3(^{55}_{27}\text{Ni}) = \frac{27-28}{2} = -\frac{1}{2}$$

$$I_3(^{55}_{28}\text{Co}) = \frac{28-27}{2} = \frac{1}{2}$$

$\Rightarrow |^{55}\text{Ni}\rangle = \left| \frac{7}{2} \ -\frac{7}{2} \right\rangle$
 $|^{55}\text{Co}\rangle = \left| \frac{7}{2} \ \frac{7}{2} \right\rangle$ dans l'iso espace.

c) $M(^{55}_{27}\text{Co}^*) = M(^{55}\text{Co}) + 2,974 \text{ MeV}$

$$M(^{55}_{28}\text{Ni}^*) = M(^{55}\text{Ni}) + 2,882 \text{ MeV}$$

$$\Delta M^* = M(^{55}_{28}\text{Ni}^*) - M(^{55}_{27}\text{Co}^*) = \Delta M + 2,882 - 2,974 \text{ MeV}$$
$$= 8,92 - 0,052 = 8,83 \text{ MeV}$$

5°) $\frac{4,48}{\text{---}} \text{---} 17\frac{1}{2}^-$

• $\frac{17^-}{2} \rightarrow \frac{7^-}{2}$

a) $\frac{3,62}{\text{---}} \text{---} 15\frac{1}{2}^-$
 $\frac{3,58}{\text{---}} \text{---} 13\frac{1}{2}^-$

$\Rightarrow \mathcal{L} \leq [\frac{17^-}{2} - \frac{7^-}{2}; \frac{17^-}{2} + \frac{7^-}{2}] = [5, 12]$

\Rightarrow Pas de chgt de partie: $\Pi 5, E 6$

$2,88 \text{---} \text{---} 11\frac{1}{2}^-$

• $\frac{17^-}{2} \rightarrow \frac{11^-}{2}$

$\mathcal{L} \in [3, 13] \Rightarrow \Pi 3, E 4$

$0 \text{---} \text{---} 7\frac{1}{2}^-$

• $\frac{17^-}{2} \rightarrow \frac{13^-}{2}$

$\mathcal{L} \in [2, 15] \Rightarrow \Pi 2, E 3$

• $\frac{17^-}{2} \rightarrow \frac{15^-}{2}$

$\mathcal{L} \in [7, 16] \Rightarrow \Pi 1, E 2$

dominante

• $\frac{15^-}{2} \rightarrow \frac{13^-}{2} \Rightarrow \Pi 1, E 2$

• $\frac{15^-}{2} \rightarrow \frac{11^-}{2} \Rightarrow \Pi 2, E 3$

Dominante

• $\frac{15^-}{2} \rightarrow \frac{7^-}{2}$

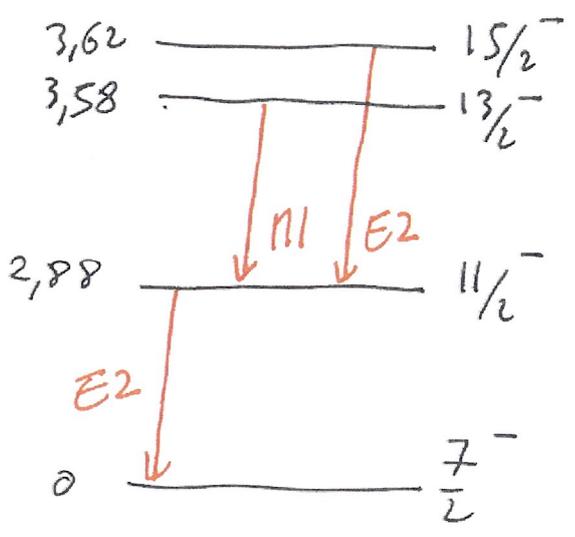
$\Rightarrow \Pi 4, E 5$

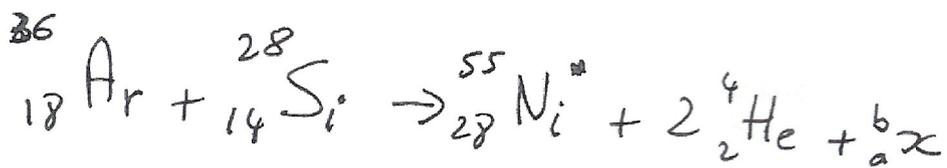
• $\frac{13^-}{2} \rightarrow \frac{11^-}{2} \mathcal{L} \in [1, 13] \Rightarrow \Pi 1, E 2$
dominante

$\frac{13^-}{2} \rightarrow \frac{7^-}{2} \mathcal{L} \in [3, 10] \Rightarrow \Pi 3, E 4$

• $\frac{11^-}{2} \rightarrow \frac{7^-}{2} \mathcal{L} \in [2, 9] \Rightarrow E 2, \Pi 3$

$\Rightarrow \frac{4,48}{\text{---}} \text{---} 17\frac{1}{2}^-$





1.5

$\Rightarrow a = 0$ et $b = 1$ donc $x = \text{neutron}$

5c) On observe l'énergie des gammas émis lors de la désexcitation du ${}^{55}\text{Ni}$.

Par résonance le bruit de fond, on demande une coïncidence entre $2\alpha, n$ et le gamma de 2,88 MeV correspondant à la transition entre l'état $\frac{11}{2}^-$ et le fondamental du ${}^{55}\text{Ni}$.

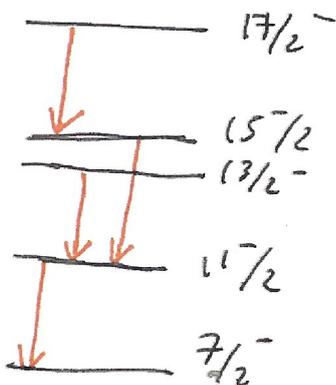
On observe 3 gamma de 700, 740 et 860 keV

$$\frac{13}{2}^- \rightarrow \frac{11}{2}^- \Rightarrow E_\gamma = 700 \text{ keV} \text{ observé!}$$

$$\frac{15}{2}^- \rightarrow \frac{11}{2}^- \Rightarrow E_\gamma = 740 \text{ keV} \text{ observé!}$$

$$\frac{17}{2}^- \rightarrow ? \quad 4,48 - 0,86 = 3,62 \Rightarrow \frac{15}{2}^- \text{ observé!}$$

donc on a



5d) Cette séquence se retrouve dans le ${}^{55}\text{Co}$ car noyaux miroirs.

6) a) ${}_{28}^{56}\text{Ni}$ noyau double magique 6
 ts les nucléons sont appariés $\Rightarrow 0^+$

b) Double-magique \Rightarrow noyau sphérique
 \Rightarrow modèle vibrationnel avec $E_1 \approx 10 \text{ MeV}$
 ici $2,7 \text{ MeV} \Rightarrow 0^+$

c) ${}_{28}^{55}\text{Ni}$ \exists d'un trou sur $1f_{7/2}$
 Couplage d'un cœur doublement magique
 avec 1 trou sur $1f_{7/2}$

Excité 1: $\underbrace{\frac{7}{2}}_{\text{mobile}} \oplus \underbrace{2}_{\text{vibrationnel}} = \frac{3}{2} \frac{5}{2} \frac{7}{2} \frac{9}{2} \frac{11}{2}$

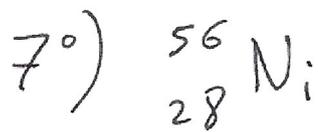
à particules indépendantes

de plus $\frac{13}{2}$ est également

$\xrightarrow{740 \text{ keV}} \frac{11}{2}$

$\xrightarrow{700 \text{ keV}} \frac{7}{2}$

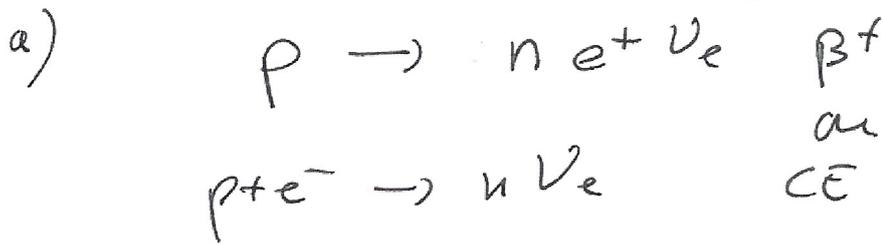
Couplage mobile en et vibrationnel.



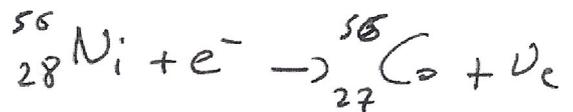
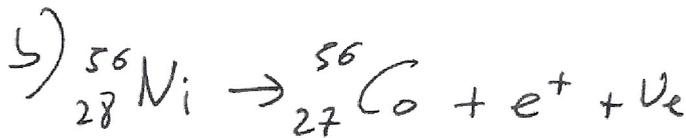
Il y a trop de protons dans

(7)

Ce noyau.



donc



$$Q = M(56, 28) - M(56, 27) - m_e$$

$$= \Delta(56, 28) - \Delta(56, 27) - 2m_e$$

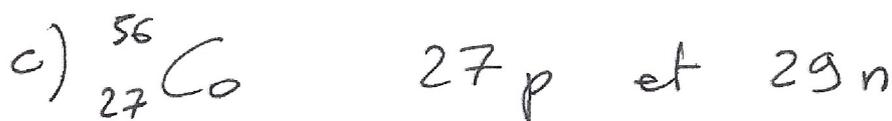
$$= -53,902 + 56,039 - 1,022$$

$$= 1,115 \text{ MeV}$$

$$Q = \Delta(56, 28) - \Delta(56, 27)$$

$$= 2,137 \text{ MeV}$$

β^+ et CE sont possibles.



$$I p \text{ sur } 1f_{7/2}$$

$$\Rightarrow \frac{7}{2}^-$$

$$I n \text{ sur } 2p_{3/2}$$

$$\Rightarrow \frac{3}{2}^-$$

Le fondamental est décrit par $2^+, 3^+, 4^+, 5^+$
Seules les interactions résiduelles élèvent
la dégénérescence de ces niveaux.

d) C'est une forêt de niveaux donc des écarts de l'ordre de 200 keV, l'ensemble des états doit être accessible.

8. a) si fermions j demi-entier donc
 $2j$ est impair.

si bosons j entier ; $2j$ pair.

$$\Psi = N (\phi - (-1)^J \phi) \text{ si fermions}$$
$$= N (\phi + (-1)^J \phi) \text{ si bosons.}$$

b) Ψ antisymétrique si J pair pour fermions
 Ψ ~~symétrique~~ $\Rightarrow J$ ~~impair~~ pour bosons.

c) ^{58}Ni un cœur de $^{56}_{28}\text{Ni}$ doublement
magique

et un extra-couple n sur $2p_{3/2}$

$$\Rightarrow J = \frac{3}{2} \oplus \frac{3}{2} = 0, 1, 2, 3 \quad \text{car } J \text{ pair}$$

$$\Rightarrow 0^+ \text{ et } 2^+$$

Cet état 4^+ n'est pas expliqué dans ce contexte.

Autre interaction ?