University of Strasbourg

Nuclear Physics 2^{nd} session

S. Courtin, N. Arbor, M. Moukaddam

Transcribed by

Pierre Guichard

M1-S2 2016-2017

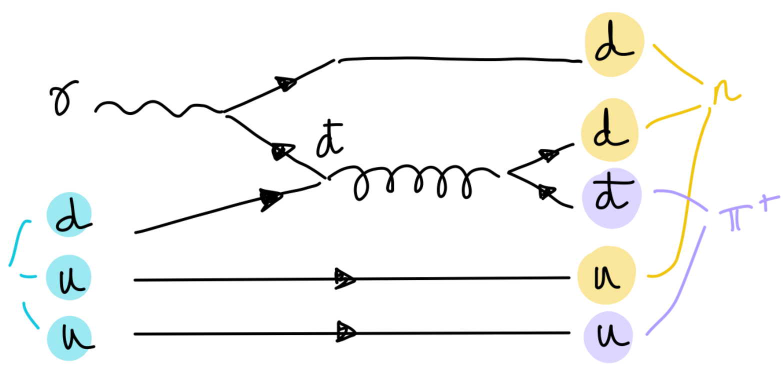
Photoproduction de mésons π^+

1. On considère la photoproduction de mésons π^+ par l'interaction entre un photon γ et un proton p :

$$\gamma p \rightarrow n\pi^+ \tag{1}$$

On donne les masses : $m_p = 0.938$ GeV/c^2, $m_n = 0.948$ GeV/c^2, $m_{\pi^+} = 0.140$ GeV/c^2.

2. Dessiner un diagramme de Feynman correspondant, sachant qu'un gluon intervient.



3. On considère la réaction au seuil de production avec un proton au repos dans le référentiel du laboratoire. En écrivant l'invariant relativiste, calculer l'énergie du photon au seuil de la réaction en fonction des masses des particules.

$$\vec{p}_p = (m_p, \vec{0}) \qquad \vec{p}_\gamma = (0, \vec{p}_0)$$

Seuil,

$$\begin{aligned} s &= (m_n + m_\pi)^2 c^2 = (\vec{p}_\gamma + \vec{p}_p)^2 \\ &= (E_\gamma + m_p)^2 - (p_\gamma)^2 \\ &= (p_0 + m_p)^2 - p_\gamma^2 \\ &= 2p_\gamma m_p + m_p^2 \\ &= (m_n + m_\pi)^2 \end{aligned} \qquad E_\gamma = p_\gamma$$

Alors,

$$p_\gamma = \frac{(m_n + m_\pi)^2 - m_p^2}{2m_p}$$

$$E_{\text{seuil}} = 0.153 \text{ MeV}$$

4. L'univers est baigné dans un rayonnement de photons fossiles à 3 Kelvin, résidu du Big Bang. On cherche à évaluer l'énergie minimum d'un proton pour produire la réaction précédente (le proton n'est donc plus au repos dans cette question). On rappelle la conversion Kelvin-eV : $k_B = 8.6 \times 10^{-5}$ eV.K^{-1}. On note θ l'angle d'incidence entre le proton et le photon. Calculer cette énergie minimum quand $\theta = 180°$ (collision frontale avec des impulsions de sens opposé). On pourra considérer le proton comme ultra-relativiste en faisant l'approximation : $E_p \simeq cp_p$.

$$E_\gamma = 3 \times k_B \sim 3 \times 10^{-13} \text{ GeV}$$

$$s = (E_p + E_\gamma)^2 - (\vec{p}_p - \vec{p}_\gamma)^2$$

Collision frontale,

$$\frac{\vec{p}_p}{|\vec{p}_p|} = -\frac{\vec{p}_\gamma}{|\vec{p}_\gamma|} \Longrightarrow \cos\theta = -1$$

$$\begin{aligned} s &= E_p^2 + 2E_p p_\gamma + p_\gamma^2 - p_\gamma^2 - p_p^2 - 2p_\gamma p_p \cos\theta \\ &= 2E_p p_\gamma - 2p_\gamma p_p \cos\theta \\ &= 2E_p p_\gamma (1 - \cos\theta) \\ &= (m_n + m_\pi)^2 \end{aligned}$$

Alors,

$$E_{\text{seuil}} = \frac{(m_n + m_\pi)^2}{4p_\gamma} \sim 2 \times 10^{11} \text{ GeV}$$

5. Faire l'application numérique (si vous ne disposez pas de calculatrice, un ordre de grandeur suffit). Qu'en conclure sur la probabilité de ce phénomène ? L'approximation ultra- relativiste est-elle justifiée ?

L'énergie de seuil est colossale, c'est alors un phénomène très rare. $E_p \gg m_p$, alors l'approche est justifiée.

Production et Étude des mésons B dans l'expérience Belle II

L'expérience Belle II emploie des faisceaux d'électrons et de positons d'énergie respectives $E_{e^-} = 8$ GeV et $E_{e^+} = 3.5$ GeV. On note les quadri-vecteurs $q_{e^-} = (E_{e^-}, \vec{p}_{e^-})$ et $q_{e^+} = (E_{e^+}, \vec{p}_{e^+})$. Les collisions entre les faisceaux ont lieu de telle sorte que

$$\frac{\vec{p}_{e^-}}{|\vec{p}_{e^-}|} = -\frac{\vec{p}_{e^+}}{|\vec{p}_{e^+}|}$$

1. Donner une expression de l'énergie disponible dans le centre de masse $\sqrt{s}$. Montrer que celle-ci peut s'approximer par :

$$\sqrt{s} \simeq 2\sqrt{E_{e^-}E_{e^+}}$$

$$\begin{aligned} s &= (E_- + E_+)^2 - (\vec{p}_- + \vec{p}_+)^2 \\ &= E_-^2 + E_+^2 + 2E_-E_+ - \vec{p}_-^2 - \vec{p}_+^2 - 2\vec{p}_-\vec{p}_+ \\ &= m_+^2 + m_-^2 + 2(E_-E_+ - \vec{p}_-\vec{p}_+) \end{aligned}$$

$$\vec{p}_-\vec{p}_+ = p_-p_+ \cos(180)$$

$m_+, m_- \ll E_+, E_-,$

$$s \sim 4E_-E_+ \to \sqrt{s} \simeq 2\sqrt{E_{e^-}E_{e^+}}$$

2. On cherche à produire préférentiellement une paire de quark $b\bar{b}$. En constatant que le méson $\Upsilon(4s)$ de masse $m(\Upsilon(4s)) = 10.58$ GeV/c^2 est composé de $b\bar{b}$, Quel est l'intérêt d'avoir choisi une telle valeur pour $\sqrt{s}$?

$$\sqrt{s} \sim m(\Upsilon(4s)) \sim 10.58 \text{ GeV}$$

On se place à la résonnance pour augmenter la section efficace de production de $b\bar{b}$.

3. Sachant que la largeur de $\Upsilon(4s)$ est de $\Gamma = 20.5$ MeV, Montrer que le temps de vie de ce méson est extrêmement court (on donne $\hbar = 6.6 \times 10^{-22}$ MeV.s). En déduire la force impliquée dans sa désintégration.

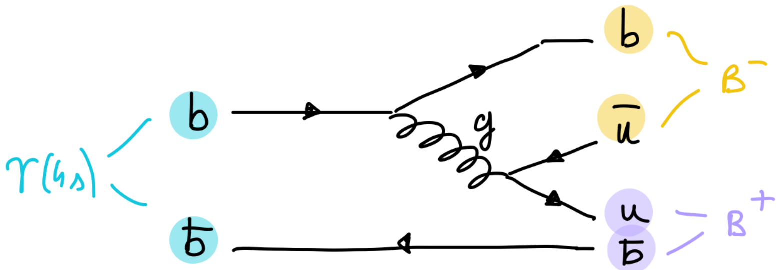
$$\tau \sim \frac{\hbar}{\Gamma} \sim \frac{6.6 \times 10^{-22}}{20.5} \sim 10^{23} \text{ s}$$

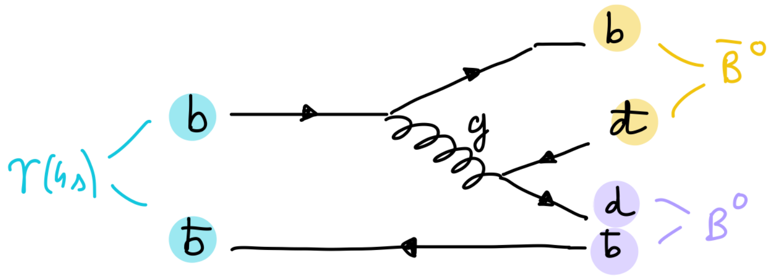
Ce temps est très court, ce qui implique que la force impliquée dans sa désintégration est l'intéraction forte.

4. Dessiner les diagrammes de désintégrations les plus simples représentant les désintégration majoraitaires :

$$\Upsilon(4s) \to B^+B^-$$
$$\Upsilon(4s) \to B^0\bar{B}^0$$

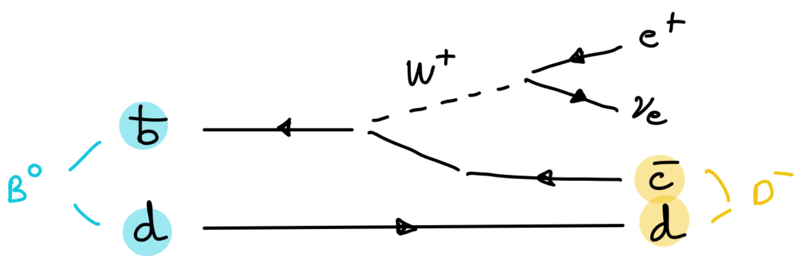
$B^+ = u\bar{b}$, $B^- = \bar{u}b$, $B^0 = d\bar{b}$, $\bar{B}^0 = \bar{d}b$

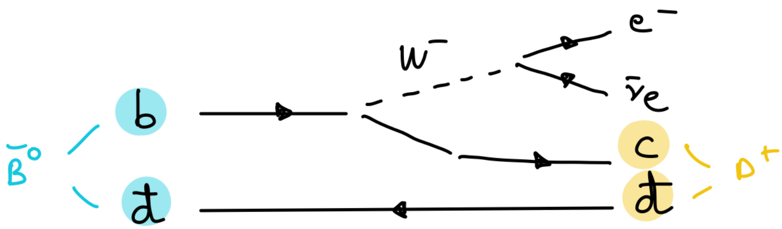




5. Sachant que les mésons neutres B^0 et $\bar{B}^0$ peuvent se désintégrer soit en $l^-\bar{\nu}_l D^+$ soit $l = \nu_l D^-$, trouver qui se désintègre en quoi et dessiner les diagrammes de désintégration correspondants.

$D^+ = c\bar{d}$, $D^- = \bar{c}d$





6. En déduire comment la détermination du signe du lepton chargé $l^\pm$ permet de déterminer la beauté de la particule mère.

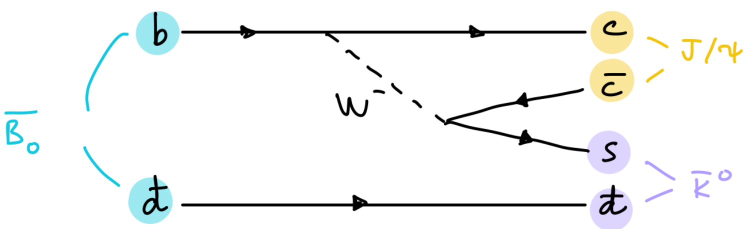
l^+ provient du $\bar{b}$, ce qui implique B^0, et l^- provient du b ce qui implique $\bar{B}^0$.

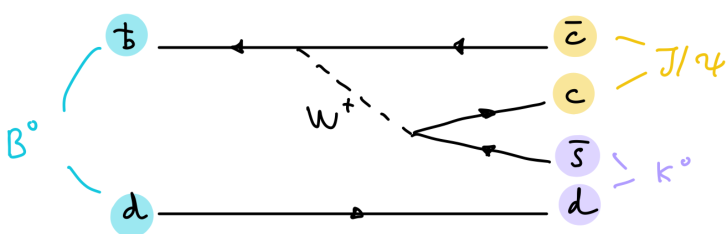
7. Un autre canal de désintégration des B neutres est le canal :

$$B^0 \to J/\psi + K^0$$
$$\bar{B}^0 \to J/\psi + \bar{K}^0$$

Dessiner les diagrammes.

$J/\psi = c\bar{c}$, $K^0 = d\bar{s}$, $\bar{K}^0 = s\bar{d}$





8. En négligeant la faible violation CP dans les kaon neutres, on peut assimiler respectivement les K^0 et les $\bar{K}^0$ à des états neutres K_S et K_L qui sont vecteurs propres de CP, tels que

$$C\,|K_S\rangle = +\,|K_S\rangle \qquad P\,|K_S\rangle = -\,|K_S\rangle$$
$$C\,|K_L\rangle = -\,|K_L\rangle \qquad P\,|K_L\rangle = -\,|K_L\rangle$$

Sachant que le méson J/Ψ a pour caractéristiques $J^{PC} = 1^{--}$ et que le moment orbital de l'état final est nul, déterminer les valeurs propres de l'opérateur CP de chacun des états finals $J/\psi + K_L$ et $J/\psi + K_S$.

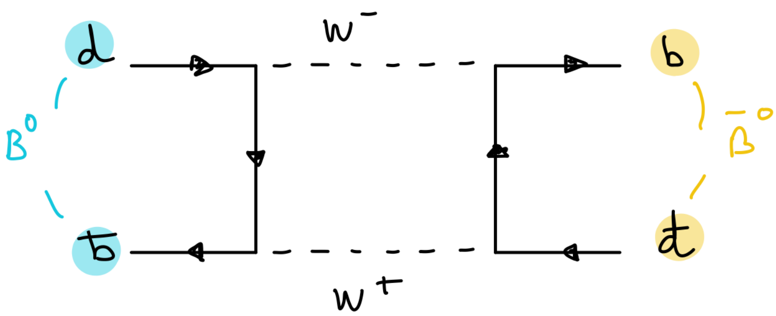
$$\begin{aligned} CP\,|J/\psi + K_S\rangle &= C(-1)(-1)\,|J/\psi + K_S\rangle \\ &= (+1)(-1)(-1)(-1)\,|J/\psi + K_S\rangle \\ &= -\,|J/\psi + K_S\rangle \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} CP\,|J/\psi + K_L\rangle &= (-1)(-1)(-1)(-1)\,|J/\psi + K_L\rangle \\ &= +\,|J/\psi + K_L\rangle \end{aligned}$$

9. Sachant qu'un état B^0 neutre peut se transformer en état $\bar{B}^0$ et vice versa (on parle d'oscillation des mésons B), expliquer dans quelle mesure une oscillation d'un B neutre isolé serait une manifestation de la violation de la symétrie CP.

Changement d'état propre de CP : $B_0 \leftrightarrow \bar{B}_0$, ce qui est une violation CP.

10. Imaginer un diagramme d'oscillation des mésons B neutres (indice : faire intervenir des bosons $W^\pm$ dans une "boite" de 4 vertex).



11. En réalité les B^0 et $\bar{B}^0$ issus de $\Upsilon(4s)$ sont toujours produits dans un état cohérent ce qui signifie qu'ils oscillent toujours en phase. Un tel système oscillant viole-t-il CP ?

En fait, le système $B^0 - \bar{B}^0$ est cohérent, ce qui veux dire qu'il ne viole pas CP globablement.