

Notice des Travaux Pratiques de
Physique Nucléaire

Expérience IX

**Etude du schéma de désintégration du
Cobalt 57 au moyen d'un détecteur au
Xénon**

Luc Simon

29 octobre 2001

Introduction

Objectifs

Nous allons essayer d'acquérir, en utilisant comme fil conducteur une expérience spécifique pour chaque groupe d'étudiants, les outils et les notions indispensables à une bonne compréhension de la physique nucléaire. Ainsi nous vous proposons les étapes suivantes :

- Familiarisation avec l'instrumentation,
- Etude de la statistique des phénomènes nucléaires,
- Etude des interactions gamma avec la matière,
- Etude des coïncidences en vue du calcul de l'activité...

Chaque étudiant disposera donc d'une notice spécifique qui contient la description de son expérience personnelle, des manipulations intermédiaires qu'ils devra effectuer, des questions auxquelles il devra répondre. Accompagné de cette première notice, chaque étudiant recevra un autre manuscrit, *La Notice Générale des Travaux Pratiques de Physique Nucléaire*, commun à tous, qui contiendra tous les approfondissements nécessaires : des explications plus exhaustives, des descriptions des phénomènes qui doivent être assimilés pour une bonne compréhension du travail pratique, des détails de calcul. Ainsi on se référera souvent à cette deuxième notice tout au long de chaque expérience et nous conseillons vivement aux étudiants de les utiliser pour combler d'éventuelles lacunes, afin de tirer le meilleur parti des manipulations. Notons que, chaque fois qu'une information complémentaire devra être cherchée dans le manuel de référence, nous nous contenterons de signaler la ou les page(s) intéressante(s) entre parenthèses.

L'expérience dont il sera question par la suite est l'étude du spectre de désintégration d'une source de cobalt 57.

Dans un premier temps nous acquerrons un certain "savoir-faire" et une compréhension des phénomènes nucléaires en utilisant un détecteur à scintillations et différentes sources de rayonnement γ (pXXX) ; puis nous étudierons

de manière plus approfondie la source de ^{57}Co , dont le schéma de désintégration est représenté sur la figure 1 ci-dessous, au moyen d'un détecteur à xénon, plus sensible aux basses énergies.

Le principe de ces détecteurs sont expliqués de manière exhaustive dans le paragraphe 'Détecteurs de particules' de la notice générale (p6).

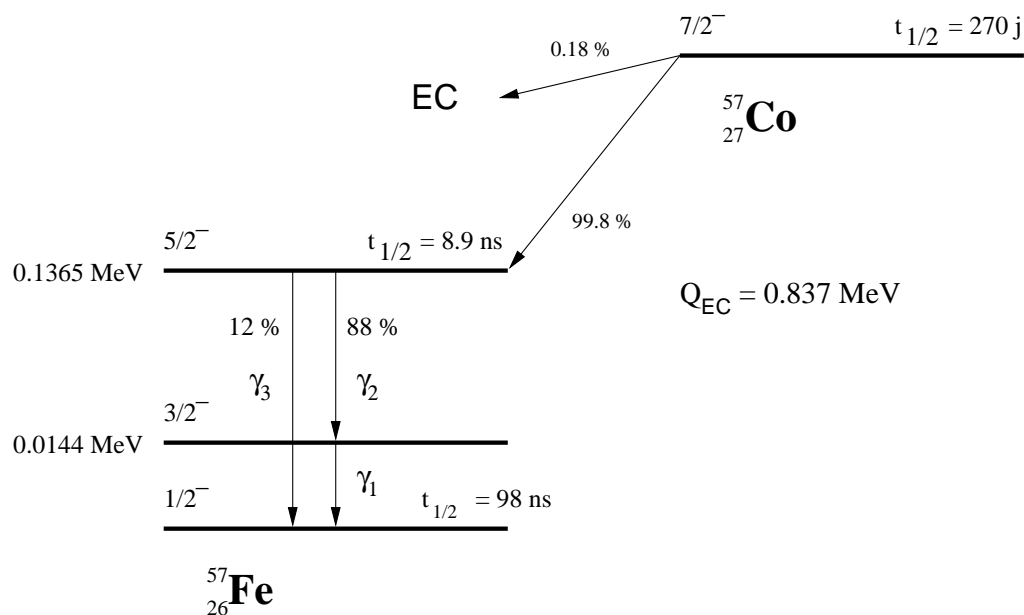


FIG. 1: Schéma de désintégration du ^{57}Co

Le détail de l'interprétation d'un tel schéma peut être trouvé au paragraphe XXX du manuel de référence. Nous pouvons cependant remarquer que cet élément émet principalement du rayonnement gamma (pXXX) de trois énergies différentes, 14.4 keV, 122 MeV, 136.4 MeV, rayonnement qui fera l'objet d'une étude particulière dans la suite de ce travail.

Nous allons dans un premier temps mettre au point une chaîne électronique pour observer le spectre de différentes sources.

Table des matières

1	Chaîne de spectrométrie à détecteur à scintillation	1
1.1	Schéma de montage	1
1.2	Calcul d'une chaîne de spectrométrie	2
1.3	Montage et contrôle	3
1.4	Utilisation de la porte	3
1.5	Réglages et caractéristiques de la chaîne	5
1.5.1	Estimation du bruit de fond	5
1.5.2	Temps de résolution	5
1.5.3	Linéarité et résolution en énergie	6
1.6	Spectrométrie γ à l'aide d'un détecteur à scintillation	7
1.6.1	Introduction	7
1.6.2	Expérience	10
1.6.3	Questions	11
2	La loi de Poisson	13
2.1	Distribution de Poisson de moyenne faible	14
2.2	Distribution de Poisson de moyenne élevée	16
2.3	Questions	17
3	Interaction des photons avec la matière	19
3.1	Atténuation	19
3.1.1	Rappel	19
3.1.2	Expérience	21
3.1.3	Questions	21
3.2	Spectrométrie γ à l'aide d'un détecteur à scintillation	23
3.2.1	Introduction	23
3.2.2	Expérience	26
3.2.3	Questions	27

4	Les coïncidences	29
4.1	Généralités sur les coïncidences	29
4.1.1	Le sélecteur de coïncidences	29
4.1.2	Les types de coïncidences	30
4.1.3	Relation entre coïncidences vraies et coïncidences fuites.	34
4.2	Expérience	35
4.2.1	Mesure du temps de résolution d'un sélecteur de coïncidences	35
4.2.2	Calibration (mesure de l'activité) d'une source de ^{60}Co	35
5	L'expérience IX	39
5.1	Introduction	39
5.2	Le schéma de désintégration du Cobalt 57	39
5.3	But	39
5.4	Principe de l'expérience	40
5.5	Conditions d'expérience et marche à suivre	41
5.5.1	Observation des spectres	42
5.5.2	Mesure de l'activité de la source	43
5.6	Questions	44

Chapitre 1

Chaîne de spectrométrie à détecteur à scintillation

Cette manipulation a pour but de familiariser l'étudiant avec les appareils de détection et le traitement des impulsions présentés aux chapitres I et II. Cela lui permettra de monter une chaîne de spectrométrie qui sera utilisée par la suite pour l'étude des phénomènes physiques.

1.1 Schéma de montage

La chaîne de spectrométrie est composée des éléments suivants :

- Un détecteur à scintillations lui-même constitué d'un cristal scintillant de NaI couplé à un photomultiplicateur donnant le signal de sortie à travers un émetteur-suiveur (ES).

La caractéristique de l'émetteur-suiveur (amplificateur dont le gain en tension vaut presque l'unité) est de présenter une grande impédance d'entrée (qui s'ajoute en parallèle à la résistance de charge de PM (fig. N.G.-2.7)) et une faible impédance de sortie. Le circuit de charge de l'anode du PM est ainsi découplé de la capacité importante du câble coaxial de sortie (67 pF/m pour un câble usuel d'impédance caractéristique de 50Ω) ou de cette impédance de 50Ω si le câble est long. L'impédance de sortie (quelques ohms), nettement plus faible que celle du câble, permet de conserver l'amplitude des impulsions.

- Un amplificateur.
- Un analyseur de bande pouvant fonctionner en discriminateur.
- En complément, on adjoindra un analyseur multicanal et son tiroir d'attaque.

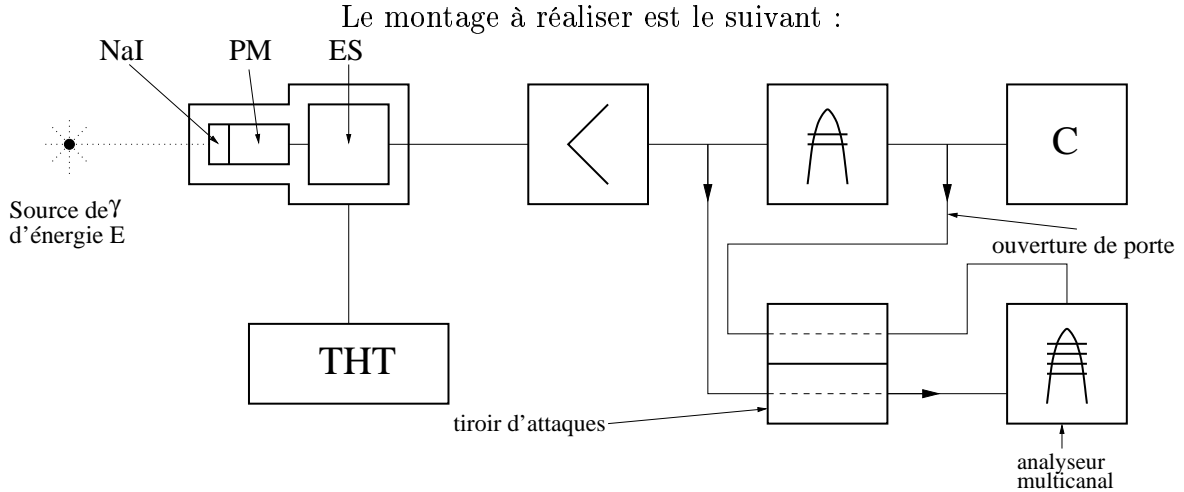


FIG. 1.1: figure de montage

1.2 Calcul d'une chaîne de spectrométrie

Les impulsions de sortie fournies par un appareil doivent être adaptées à l'entrée de l'appareil suivant en amplitude et en forme (temps de montée, durée, temps de descente). Il faut donc comparer les caractéristiques de sortie et d'entrée des appareils et effectuer les réglages nécessaires. Ces caractéristiques sont rassemblées dans un recueil à disposition.

L'amplitude des impulsions délivrées par un détecteur à scintillation dépend de la forme de ces impulsions, forme donnée par la valeur du rapport $k = RC/\tau$, où RC est la constante de temps du circuit de charge du photomultiplicateur et τ la constante de décroissance lumineuse du scintillateur. On peut alors calculer le gain G du PM (voir §2.5.2 de la notice générale) de telle manière que l'amplitude V de l'impulsion délivrée à la sortie du détecteur soit de l'ordre de 0,2 V. Cette tension permet d'obtenir pour un gain choisi de manière arbitraire sur l'amplificateur externe (environ $\times 50$), l'amplitude maximale admise par l'analyseur.

Si on considère que l'on a une relation linéaire entre la charge déposée et la tension à la sortie du détecteur, on peut calculer le gain au moyen de la formule suivante :

$$\begin{aligned}
 V &= \max [a(k)] \cdot V^\infty = \max [a(k)] \cdot \frac{q}{C} \\
 &= \frac{\max [a(k)]}{C} \cdot \frac{E\eta}{h\nu} \cdot f \cdot \varepsilon \cdot G \cdot e
 \end{aligned}
 \tag{1.1}$$

avec les caractéristiques suivantes,

$a(k)$: équation N.G.-2.12 ($= \frac{V}{V_\infty}$)

q : charge totale collectée en sortie du PM

$\frac{E\eta}{h\nu}$: nombre de photons produit par le scintillateur

f : facteur de collection sur la photocathode ($\cong 50\%$)

ε : rendement quantique de la photocathode

G : gain

e : charge de l'électron.

La courbe donnant le gain G en fonction de la tension interdynode (ou en fonction de la tension totale), permet de déterminer la haute tension à appliquer au PM, compte tenu de la division de tension d'alimentation du PM. (Remarque : le gain d'un PM particulier peut différer d'un facteur 3 du gain moyen indiqué dans les notices d'appareils).

Contrôler que les caractéristiques limites du PM ne sont pas dépassées.

1.3 Montage et contrôle

En présence de la source de γ , appliquer la haute tension progressivement en contrôlant l'amplitude et la forme des impulsions de sortie du détecteur avec un oscilloscope.

Ces impulsions sont distribuées selon un spectre qui est celui des énergies déposées dans le scintillateur. La forme de ce spectre sera discutée à la manipulation 3 ; son amplitude maximum (plus précisément : l'amplitude moyenne du pic photoélectrique) correspond à l'énergie E des γ incidents. Une fois obtenue l'amplitude désirée à la sortie de l'amplificateur, comparer la valeur de la haute tension calculée à celle effectivement nécessaire. Connecter les appareils de la chaîne spectrométrique en effectuant les réglages nécessaires et en contrôlant les impulsions de sortie de chaque appareil. Obtenir un taux de comptage sur une échelle et un spectre sur l'analyseur multicanal.

1.4 Utilisation de la porte

Les impulsions de sortie du discriminateur ou de l'analyseur de bande peuvent être utilisées pour ouvrir la porte de l'analyseur multicanal aux impulsions de sortie de l'amplificateur. Le seuil de discrimination ou la fenêtre

acceptée par l'analyseur de bande peuvent ainsi être directement visualisés sur la partie restante du spectre enregistré sur l'analyseur multicanal et être ainsi définis rapidement. Cette méthode est plus rapide que celle qui consiste à relever le spectre intégral avec un discriminateur ou le spectre différentiel avec un analyseur de bande pour ensuite placer le seuil ou la fenêtre aux énergies voulues.

(D'une manière plus générale, la visualisation d'un spectre accumulé sur un analyseur multicanal auquel on a imposé une "condition de porte", permet d'apprécier l'effet des conditions physiques (ici, la valeur du seuil et celle de la fenêtre) sur le spectre en énergie. Cette mesure "en coïncidence" est courante en physique nucléaire, nous y reviendrons à de multiples occasions lors de ces travaux pratiques).

Le tiroir d'attaque (fig. 1.1) sert à retarder l'impulsion analogique venant de l'amplificateur (retard variable) et à former une impulsion logique de durée appropriée (durée variable) à partir de celle donnée par le discriminateur. Le choix de ces deux paramètres permet d'encadrer temporellement l'impulsion analogique par l'impulsion logique qui ouvre la porte de l'analyseur multicanal (fig. 1.1).

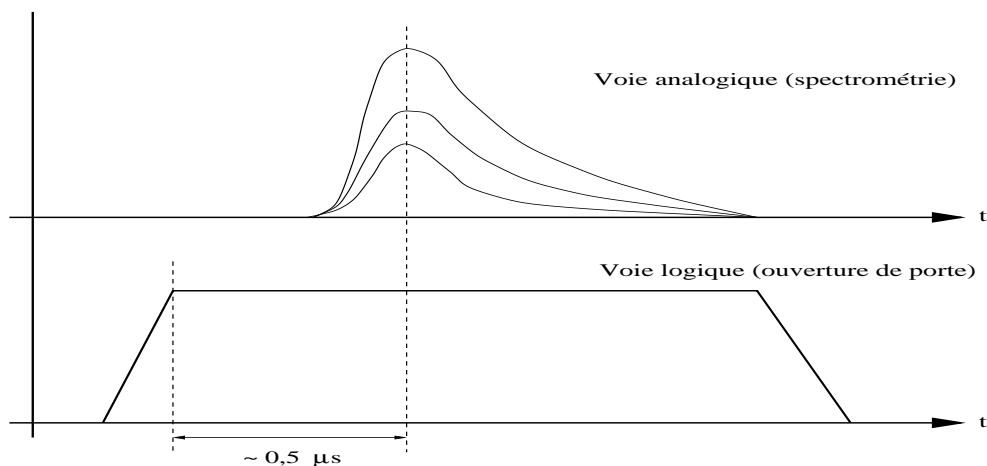


FIG. 1.2: Synchronisation de la porte et de la voie analogique

Le réglage se fait en observant la séquence temporelle des deux impulsions à l'aide d'un oscilloscope. Observer ensuite le déplacement de la coupure sur le spectre affiché sur l'analyseur en fonction du seuil de discrimination.

1.5 Réglages et caractéristiques de la chaîne

On peut maintenant étudier les différentes caractéristiques de la chaîne de spectrométrie :

1. le rapport du signal de la source sur le bruit de fond
2. la résolution temporelle (l'intervalle de temps pendant lequel on ne peut pas enregistrer de signal)
3. la linéarité entre l'énergie déposée par les photons et la tension à la sortie du photomultiplicateur
4. la résolution en énergie.

1.5.1 Estimation du bruit de fond

Contrôler le bruit de fond du PM en enlevant la source, le seuil du discriminateur étant au minimum. Monter ce seuil si nécessaire. Mesurer la fréquence du bruit de fond avec le détecteur hors et dans le château de plomb.

1.5.2 Temps de résolution

Déterminer le temps de résolution (paragraphe N.G-3.9) de la chaîne spectrométrique à partir des temps de résolution des différents appareils donnés dans les caractéristiques techniques et en déduire le taux de comptage pour lequel la perte de comptage dépasse 1%.

Méthode “des deux sources” pour la détermination du temps de résolution de la chaîne

Si le temps de résolution n'avait pas ou être trouvé dans les caractéristiques du discriminateur, on aurait quand même pu le déterminer en observant à l'oscilloscope les impulsions de sortie du discriminateur soumis à un très grand taux.

Une autre méthode, appelée “méthode des deux sources”, permet également de déterminer le temps de résolution de la chaîne.

Prenons deux sources 1 et 2 ayant à peu près les mêmes activités et désignons par n_1 , n_2 et n_{12} les taux d'événements ionisants produits dans le détecteur quand celui-ci est irradié par la première, la deuxième puis l'ensemble des deux sources et par n_e le taux d'événements du bruit de fond. Nous avons alors :

$$n_1 + n_2 = n_{12} + n_e \quad (1.2)$$

Si m_1 , m_2 , m_{12} et m_e sont les taux de comptage correspondants, il vient, en tenant compte des corrections :

$$\frac{m_1}{1 - m_1\tau} + \frac{m_2}{1 - m_2\tau} = \frac{m_{12}}{1 - m_{12}\tau} + \frac{m_e}{1 - m_e\tau} \quad (1.3)$$

Cette relation donne une équation du second degré en τ . Dans l'hypothèse où le taux m_e est très inférieur aux taux m_1 , m_2 et m_{12} , la solution de cette équation est :

$$\tau = \frac{1 - \left(1 - \frac{m_{12}}{m_1 m_2} (m_1 + m_2 - m_{12} - m_e)\right)^{\frac{1}{2}}}{m_{12}} \quad (1.4)$$

L'erreur relative sur τ est :

$$\frac{\sigma_\tau}{\tau} = \frac{A^{-\frac{1}{2}}}{2m_1 m_2 \tau} \sqrt{\sigma_{m_1}^2 + \sigma_{m_2}^2 + \sigma_{m_{12}}^2 + \sigma_{m_e}^2} \quad (1.5)$$

$$\frac{\sigma_\tau}{\tau} = \frac{A^{-\frac{1}{2}}}{2m_1 m_2 \tau} \sqrt{\frac{N_1}{t_1^2} + \frac{N_2}{t_2^2} + \frac{N_{12}}{t_{12}^2} + \frac{N_e}{t_e^2}} \quad (1.6)$$

$$\text{avec } A = 1 - \frac{m_{12}}{m_1 m_2} (m_1 + m_2 - m_{12} - m_e)$$

$N_i =$ nombre d'événements comptés pendant t_i

Dans une première série de comptages rapides, placer les deux sources de manière à ce que les deux taux de comptage m_1 et m_2 soient voisins (leur différence ne doit pas dépasser 10%) et que le rapport $m_{12}/2m_1$ soit de l'ordre de 90%. Vérifier que le taux de bruit de fond ne dépasse pas 2% du taux individuel m_1 ou m_2 . Ces conditions sont nécessaires à la validité de la relation approchée donnée pour la valeur du temps mort (Eq 1.4). Accumuler ensuite les nombres d'événements N_1 , N_2 , N_{12} et N_e de telle manière que l'erreur statistique sur les taux de comptage m_1 , m_2 , m_{12} et m_e soit inférieure au pourcent : il s'agit, en effet, de mesurer des différences relatives de taux de 5%!

Dans cette mesure, il faut replacer les sources **exactement** dans les mêmes conditions et, de préférence, pas trop près l'une de l'autre pour éviter des différences de taux de comptage dues à des effets de géométrie et de diffusion.

1.5.3 Linéarité et résolution en énergie

La linéarité entre l'énergie déposée dans le cristal de NaI lors d'une détection et l'amplitude de l'impulsion de sortie de l'amplificateur, de même que la résolution en énergie seront déterminées à la manipulation 3.2.

1.6 Spectrométrie γ à l'aide d'un détecteur à scintillation

1.6.1 Introduction

Supposons que l'on ait un faisceau de γ monocinétiques, d'énergie $E_\gamma < 2 m_0 c^2$ où $m_0 c^2 = 0.511$ MeV est la masse au repos de l'électron.

Les interactions possibles de ces γ dans le scintillateur sont (figure 3.2, situations 1 et 2) :

1. effet photoélectrique donnant un électron d'énergie $E_e = E_\gamma - E_{liaison}$
2. effet Compton :
l'énergie de l'électron dépend alors de l'angle de diffusion du γ ; elle est comprise entre 0 et une valeur maximale

$$E_{e,max} = \frac{E_\gamma}{1 + \frac{m_0 c^2}{2E_\gamma}} \quad (1.7)$$

La planche 4 donne le coefficient total d'atténuation pour un scintillateur de NaI (Tl) en fonction de l'énergie des γ , ainsi que les contributions respectives de l'effet photoélectrique, de l'effet Compton et de la création de paires à ce coefficient.

Comme le signal de détection d'anode du photomultiplicateur a, dans notre montage, une amplitude V proportionnelle à l'énergie perdue par la (ou les) particule(s) chargée(s) dans le scintillateur, le spectre donnant le nombre de γ détectés ayant produit une impulsion d'amplitude comprise entre V et $V + \Delta V$ devrait avoir la forme suivante :

Les phénomènes suivants vont modifier l'aspect du spectre :

1. Les diffusions multiples des γ : les γ diffusés par effet Compton peuvent subir de nouvelles interactions dans le scintillateur.
2. Lors d'un effet photoélectrique, l'énergie du X de réarrangement (28.5 KeV environ après un effet photoélectrique sur la couche K de l'Iode du NaI) est en général réabsorbée dans le cristal par des effets photoélectriques successifs : le pic photoélectrique correspond finalement à l'énergie E . Cependant, lorsque l'énergie du γ est proche de l'énergie correspondante au "saut K " du coefficient d'atténuation (33,17 KeV) (planche 4), la probabilité qu'a le γ d'interagir près de la face d'entrée

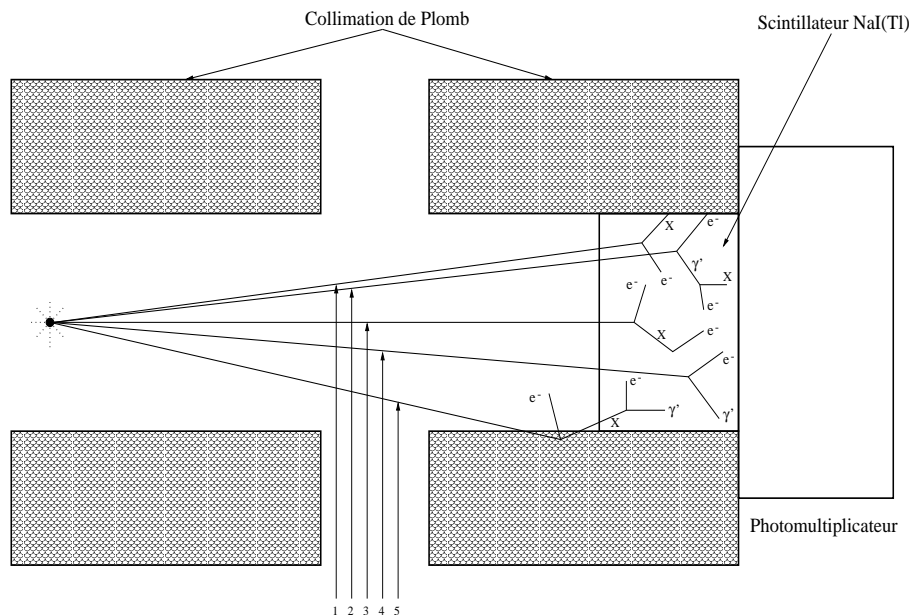


FIG. 1.3: Interactions des γ d'énergie inférieure à 1.022 MeV dans le scintillateur NaI(Tl)

- 1 : Effet photoélectrique
- 2 : Effet photoélectrique avec réabsorption du rayon X de réarrangement
- 3 : Effet Compton
- 4 : Effet Compton avec réabsorption du γ' diffusé
- 5 : Effet photoélectrique du γ dans la collimation, suivi de l'absorption dans le NaI du rayon X de réarrangement.

du cristal est grande et, dans ce cas, celle du X de réarrangement de s'échapper aussi. Le pic associé à ce phénomène, appelé "pic d'échappement", correspond à l'énergie $E = E_\gamma - E_{X\text{réarrangement}}$.

3. Contribution parasite due aux photons diffusés dans le milieu entourant le scintillateur (cet effet peut être diminué en utilisant une collimation appropriée).
4. Enfin, la résolution en énergie du détecteur à scintillations.

Nous avons donné l'allure du spectre pour un faisceau de γ monocinétiques. Le spectre relevé contiendra en réalité des contributions dues à toutes les autres radiations qui sont capables de parvenir dans le cristal de NaI : X de conversion interne, photons d'annihilation de β^+ émis, etc...

On se reportera aux schémas de désintégration pour l'interprétation des spectres.

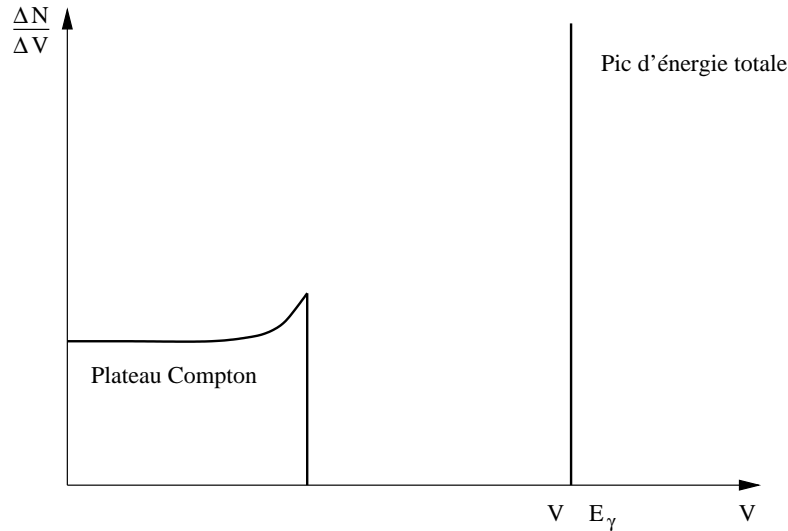


FIG. 1.4: Spectre idéal de l'effet Compton et de l'effet photoélectrique

Complément : Le coefficient μ d'atténuation linéaire des γ dans un **scintillateur plastique** généralement utilisé pour la détection des particules chargées est donné à la planche 5. On remarque qu'au dessus de 30 keV, l'effet photoélectrique dans ce type de scintillateur est négligeable : les spectres ne présenteront que le "plateau Compton" entre 30 keV et quelques MeV. On remarque également que le coefficient d'atténuation μ pour le scintillateur plastique est environ de un à deux ordres de grandeur plus petit que celui du NaI entre 10 keV et 10 MeV.

Addendum : Calcul des **probabilités de détection**. La probabilité de détection p d'une particule émise par une source s'écrit, à l'approximation d'un faisceau parallèle :

$$p = \frac{\Omega}{4\pi} \cdot e \cdot f \cdot a \quad (1.8)$$

où

- Ω = angle solide du détecteur vu de la source
- e = efficacité du détecteur à ces particules
- f = fraction du spectre au dessus du seuil de discrimination
- a = fraction du faisceau non atténué entre la source et le détecteur.

Dans le cas d'un faisceau non parallèle de γ tombant sur un cristal de NaI de 1" de diamètre et d'épaisseur, la fonction p/fa est reportée à la planche 8 pour différentes distances source-face avant du cristal.

On obtiendra un spectre de la forme :

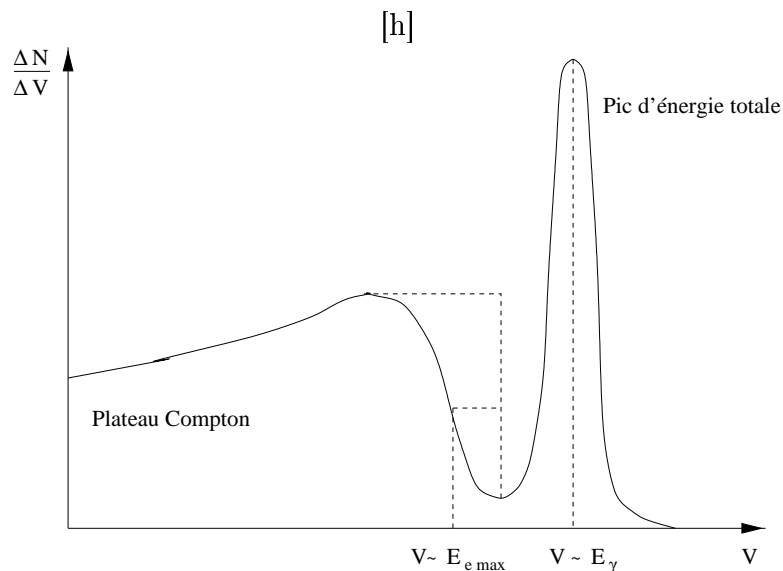


FIG. 1.5: Spectre réaliste de l'effet Compton et de l'effet photoélectrique

1.6.2 Expérience

Le montage expérimental comprend un détecteur à scintillations équipé d'un cristal de NaI(Tl), une collimation de plomb de 25 cm, un amplificateur et un analyseur multicanal. Après amplification, les impulsions seront analysées et enregistrées par l'analyseur.

La manipulation consiste à :

1. Relever le spectre différentiel de plusieurs des sources suivantes : ^{210}Pb , ^{57}Co , ^{241}Am , ^{137}Cs , ^{22}Na , ^{203}Hg et ^{60}Co et à donner l'origine des pics observés.
2. Déterminer l'amplitude des impulsions correspondant aux centres de gravité de ces différents pics.
3. Vérifier que la chaîne de détection est linéaire en reportant sur un graphique l'amplitude des différents pics et, éventuellement, sauts Compton, en fonction de l'énergie correspondante.
4. Calculer les résolutions σ_E/E de quelques pics d'énergies bien différentes et de les comparer aux valeurs attendues en utilisant la relation donnée à la page C.I-12.
Vérifier la dépendance en $\frac{1}{\sqrt{E}}$ de la résolution en reportant sur un graphique σ_E/E en fonction de $(E)^{-1/2}$.

5. Relever et interpréter le spectre du radioélément qui sera utilisé dans l'expérience finale et dont le schéma de désintégration est donné au chapitre qui s'y rapporte.

1.6.3 Questions

1. Comment varie, qualitativement, la forme d'un spectre avec l'énergie des photons? Comparer les spectres relevés.
2. Quelle est la modification du spectre qu'entraînent les photons diffusés par effet Compton dans le milieu entourant le cristal? Comment réduire l'importance de ces diffusions tout en évitant de détecter les X de réarrangement issus de la collimation? Comparer les spectres du ^{137}Cs relevés avec et sans collimation de plomb.
3. Quelles sont les efficacités d'un cristal de NaI et d'un plastique scintillant NE102A de 1" d'épaisseur (2.54 cm) pour un faisceau de photons parallèle de 0.66 MeV du ^{137}Cs ?

Chapitre 2

La loi de Poisson

Cette manipulation a pour but de mettre en évidence la nature statistique du phénomène d'émission et de détection des particules nucléaires, de vérifier le modèle présenté au paragraphe N.G.-4.4.3 concernant la nature poissonnienne du nombre de coups comptés dans un intervalle de temps fixé lorsque l'activité de la source radioactive est constante ou de très longue période par rapport à la durée des mesures, et de vérifier certaines des propriétés de la loi de Poisson.

On dispose d'un poste de comptage et d'un détecteur ; on enregistre plusieurs fois de suite dans les mêmes conditions le nombre d'événements détectés pendant une durée Δt . On construit l'histogramme de cet ensemble de mesures, c'est-à-dire la figure graphique représentant la fréquence $f(N)$ d'observation des différents nombres de coups N comptés pendant Δt en fonction de N .

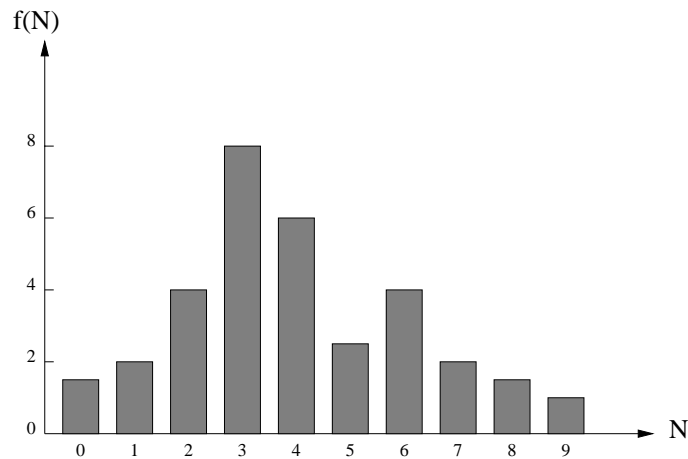


FIG. 2.1: Histogramme de l'ensemble des mesures

Pour la manipulation proprement dite, choisir entre l'étude de la distribution de Poisson de moyenne faible et celle de la distribution de moyenne élevée présentées ci-dessous.

2.1 Distribution de Poisson de moyenne faible

On désire compter en moyenne 8 événements en Δt . On choisit $\Delta t = 10$ s par commodité. On ajuste le taux de comptage du bruit de fond ou d'une source à ces valeurs en réglant l'analyseur de bande ou encore la distance source-détecteur en conséquence. On demande un ajustement à une précision de 5%. Combien faut-il compter d'événements dans cette mesure préalable pour atteindre cette précision ? Il est recommandé de s'en tenir à la moyenne de 8 événements pour éviter d'avoir un trop grand nombre de valeurs observées.

On effectue ensuite 100 mesures de durée Δt qui constituent notre échantillon. Sur l'analyseur multicanal, **on utilisera le mode MCS (Multi-channel Scaling)** qui permet de dénombrer et de stocker dans les cases mémoire de l'analyseur le nombre de coups arrivant dans un intervalle de temps de comptage Δt (Dwell time) que l'on déterminera pour obtenir un nombre moyen de coups de 8 environ. A partir de cet échantillon et à l'aide d'une calculatrice programmable ou des programmes d'ordinateur mis à disposition :

1. Calculer la moyenne \bar{N} de l'échantillon : $\bar{N} = \frac{\sum N_i}{100}$
2. Calculer les fréquences d'observation $f(N)$ des diverses valeurs obtenues N_i ($i=1, \dots, 100$) de la variable aléatoire N .
3. Calculer par récurrence les probabilités théoriques : $p(N) = \bar{N}^N \cdot \frac{e^{-\bar{N}}}{N!}$
4. Reporter dans un tableau les fréquences d'observation mesurées et théoriques ($= 100 p(N)$) et dessiner les histogrammes correspondants
5. Calculer l'écart-type de la distribution mesurée (estimation de σ)

$$\hat{\sigma}_{\bar{N}} = \sqrt{\frac{1}{100} \sum_1^{100} (N_i - \bar{N})^2} = \sqrt{\frac{1}{100} \sum_{N=0}^{\infty} (N - \bar{N})^2 f(N)} \quad (2.1)$$

et comparer à l'écart-type d'une distribution de Poisson de moyenne \bar{N} :

$$\sigma_{\bar{N}} = \sqrt{\bar{N}}$$

6. Calculer l'erreur relative qu'on aurait si l'on déterminait la moyenne \bar{N} par une seule épreuve donnant $N_1 = \bar{N}$:

$$\sigma_{\bar{N}} = \sqrt{N_1} \quad \varepsilon_1 = \frac{\sigma_{\bar{N}}}{\bar{N}} \quad (2.2)$$

7. Calculer l'erreur relative en considérant les 100 épreuves comme une seule épreuve de durée 100 fois plus longue donnant directement \bar{N}

$$\sigma_{\bar{N}} = \frac{\sqrt{\sum N_i}}{100} \quad \bar{N} = \frac{\sum N_i}{100} \quad \varepsilon_2 = \frac{\sigma_{\bar{N}}}{\bar{N}} = \frac{\frac{\sqrt{\sum N_i}}{100}}{\frac{\sum N_i}{100}} \quad (2.3)$$

Comparer les valeurs ε_1 et ε_2 obtenues et commenter.

8. Vérifier par le test de χ^2 l'hypothèse que les fréquences $f(N)$ sont distribuées suivant une loi de Poisson. Grouper les classes marginales pour que les deux classes extrêmes ainsi formées contiennent au moins cinq événements. Justifier cette exigence de grouper les classes extrêmes.

2.2 Distribution de Poisson de moyenne élevée

Rappelons que lorsque la moyenne est grande, la distribution de Poisson tend vers une distribution de Gauss de même moyenne N et d'écart type $\sigma = \sqrt{N}$

Compter en moyenne 800 événements pendant Δt . Choisir $\Delta t = 10$ s par commodité. Ajuster le taux de comptage d'une source en réglant l'analyseur de bande ou encore la distance source-détecteur. Effectuer cet ajustement à une précision de 5%. Combien faut-il compter d'événements pour atteindre ce but ?

Ensuite, effectuer 100 mesures de durée Δt . On utilisera **l'analyseur multicanal en mode MCS** (Multichannel Scaling) qui permet de dénombrer et se stocker dans les cases mémoire de l'analyseur le nombre de coups arrivant dans un intervalle de temps de comptage Δt (Dwell time) que l'on déterminera pour obtenir le nombre moyen de coups désiré.

A partir de cet échantillon de 100 mesures et à l'aide d'une calculatrice programmable ou à l'aide des programmes mis à disposition :

1. Calculer la moyenne \bar{N} de l'échantillon : $\bar{N} = \frac{\sum N_i}{100}$
2. Répartir les valeurs obtenues N_i ($i = 1 \dots 100$) en C classes de valeur médiane $N(C)$ et de 10 unités de largeur en centrant la première classe sur la moyenne. Calculer les fréquences d'observation $f(C)$ dans chaque classe.
3. Reporter dans un tableau les fréquences observées et théoriques de chaque classe en utilisant une table de la fonction de Gauss standard (moyenne = 0, $s = 1$) et de son intégrale :

$$\Phi(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{t^2}{2}} \quad \Psi(x) = \int_0^x \Phi(t) dt \quad (2.4)$$

en effectuant le changement de variable $t_i = \frac{N_i - \bar{N}}{\sqrt{\bar{N}}}$

Remarques

- les fréquences théoriques de chaque classe étant symétriques par rapport à la moyenne, il suffit d'en calculer la moitié.
 - Une table de la fonction normalisée de Gauss est donnée dans l'Annexes N.G.-A de la notice.
4. Dessiner les histogrammes des fréquences observées et théoriques.
 5. Calculer l'écart-type de la distribution relevée (estimation de σ) :

$$\hat{\sigma}_{\bar{N}} = \sqrt{\frac{1}{100} \cdot \sum_1^{100} (N_i - \bar{N})^2} = \sqrt{\frac{1}{100} \cdot \sum_{N=0}^{\infty} (N - \bar{N})^2 f(N)} \quad (2.5)$$

et comparer avec l'écart-type que donne la théorie pour une moyenne \bar{N} : $\sigma_{\bar{N}} = \sqrt{\bar{N}}$

6. Calculer la valeur de l'erreur relative qu'on aurait si l'on déterminait la moyenne N avec une seule épreuve donnant $N_1 = \bar{N}$:

$$\sigma_{\bar{N}} = \sqrt{N_1} \quad \varepsilon_1 = \frac{\sigma_{\bar{N}}}{\bar{N}} \quad (2.6)$$

7. Calculer l'erreur relative en considérant les 100 épreuves comme une seule épreuve tentée pour déterminer \bar{N} (durée : 100 Δt)

$$\sigma_{\bar{N}} = \frac{\sqrt{\sum N_i}}{100} \quad \bar{N} = \frac{\sum N_i}{100} \quad \varepsilon_2 = \frac{\sigma_{\bar{N}}}{\bar{N}} = \frac{\frac{\sqrt{\sum N_i}}{100}}{\frac{\sum N_i}{100}} \quad (2.7)$$

Comparer au résultat obtenu sous (6) et commenter.

8. Dénombrer les mesures pour lesquelles $\bar{N} - \hat{\sigma}_N < N_i < \bar{N} + \hat{\sigma}_N$. Comparer avec la probabilité théorique correspondante.
9. Vérifier par le test de χ^2 l'hypothèse que la distribution observée est gaussienne de variance égale à la moyenne.

2.3 Questions

- a) Combien d'événements doit-on compter pour obtenir sur la détermination de la fréquence une erreur relative de 5%, 1%, 0.5%, 0.1% ?
- b) Soit une source s en présence d'un bruit de fond bf . On obtient le taux de comptage m_s dû à la source seule à partir de 2 mesures (m_{s+bf} pendant le temps t_{s+bf} et m_{bf} pendant t_{bf}) par $m_s = m_{s+bf} - m_{bf}$. Si le temps de mesure total $t = t_{s+bf} + t_{bf}$ est limité, quel doit être le rapport t_{s+bf}/t_{bf} pour obtenir la précision maximum sur m_s ? La méthode consiste à chercher le minimum de $\sigma_{m_s}^2(t_{s+bf}, t - t_{s+bf})$. Calculer ce rapport pour $m_{s+bf} = 10$ et $m_{bf} = 1$.
- c) Combien faut-il compter d'événements pour que l'erreur sur l'estimation du centre de gravité d'un pic gaussien de 100 KeV dont largeur à mi-hauteur n'excède pas 10 KeV avec une probabilité de 95.5% ? (utiliser le théorème central limite N.G.-4.3.4).

Chapitre 3

Interaction des photons avec la matière

3.1 Atténuation

3.1.1 Rappel

Dénomination des interactions

Les photons, quanta du champ électromagnétique, dont l'énergie et la quantité de mouvement satisfont aux relations de de Broglie, portent des noms différents suivant leurs origines, bien que leurs propriétés ne dépendent que de leur énergie E :

- rayons X caractéristiques, provenant de transitions dans les couches électroniques des atomes ($E_{max} = 100$ KeV)
- rayons γ caractéristiques, provenant de transitions nucléaires (1 KeV $\leq E \leq 10$ MeV)
- rayons X et γ ayant des spectres continus et provenant du freinage, dans la matière, de particules chargées
- rayons γ résultant de l'annihilation d'une paire particule-antiparticule.

Les interactions des photons avec la matière sont les suivantes :

1. Interactions conduisant à l'annihilation du photon
 - a) l'effet photoélectrique : interaction photon-électron. C'est l'absorption du photon γ par un électron lié. L'énergie du γ doit être supérieure à l'énergie de liaison de l'électron.
 - b) la photodésintégration : C'est l'absorption du photon par le noyau qui peut ensuite se désintégrer. Exemple : $\gamma + {}^2\text{H} \rightarrow \text{p} + \text{n}$

- c) la création de paires dans le champ coulombien. Un photon peut se matérialiser en une paire électron-positon pour autant que $E_\gamma > 2m_0c^2$ (m_0c^2 est la masse au repos d'un électron)

2. Diffusion du photon

Le photon peut être diffusé par un électron auquel il cède une partie de son énergie : c'est l'effet Compton. Il peut avoir lieu avec des électrons liés pour autant que l'énergie cédée à l'électron soit bien supérieure à son énergie de liaison.

Atténuation

L'effet global des interactions avec la matière d'un faisceau parfaitement collimaté d'intensité I_0 (photons/s) est une atténuation, c'est à dire une diminution progressive du nombre de photons, sans dégradation de leur énergie. On considère que tout photon ayant subi une interaction est enlevé du faisceau. Les trois effets fondamentaux responsables de l'atténuation sont l'effet photoélectrique, l'effet Compton et la création de paires électron-positon. La loi d'atténuation est exponentielle : elle exprime que la probabilité qu'à chaque photon d'interagir reste la même, quelque soit le nombre de photons restant dans le faisceau. Si $-dI$ est le nombre de photons éliminés du faisceau après une épaisseur dx de matière,

$$-\frac{dI}{I} = \mu(E_\gamma, Z)dx$$

ou encore,

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu(E_\gamma, Z)x}$$

$\mu(E_\gamma, Z)$ est le coefficient d'atténuation linéaire et dépend de l'énergie du photon et de la nature de l'écran. Il a la dimension inverse de celle d'une longueur.

$$\mu(E_\gamma, Z) = \mu_{ph}(E_\gamma, Z) + \mu_c(E_\gamma, Z) + \mu_p(E_\gamma, Z) \quad (3.1)$$

μ_{ph} , μ_c , μ_p sont les coefficients partiels d'atténuation linéaire dus aux trois effets précités ; x est l'épaisseur de matière traversée.

La loi d'atténuation peut se mettre sous la forme :

$$I = I_0 e^{-\mu_d \cdot d} \quad (3.2)$$

où

$\mu_d = \frac{\mu}{\rho}$ est le coefficient d'atténuation massique (exprimé en $\frac{cm^2}{g}$)

$d = \rho \cdot x$ est la densité superficielle de l'écran (exprimée en $\frac{g}{cm^2}$)

ρ est la masse volumique de l'écran.

Les coefficients μ ou μ_d sont donnés dans les tables de la notice générale. On trouvera sur les planches 4 à 7 les coefficients d'atténuation linéaire pour un certain nombre de corps.

3.1.2 Expérience

Montage expérimental

Le dispositif expérimental comprend une source de γ (utiliser de préférence du ^{137}Cs), un poste de comptage à détecteur de γ , des écrans d'Al et de Pb et des anneaux de plomb de collimation. **Pour que la collimation soit efficace, il faut au minimum 25 cm de Pb entre la source et le détecteur.**

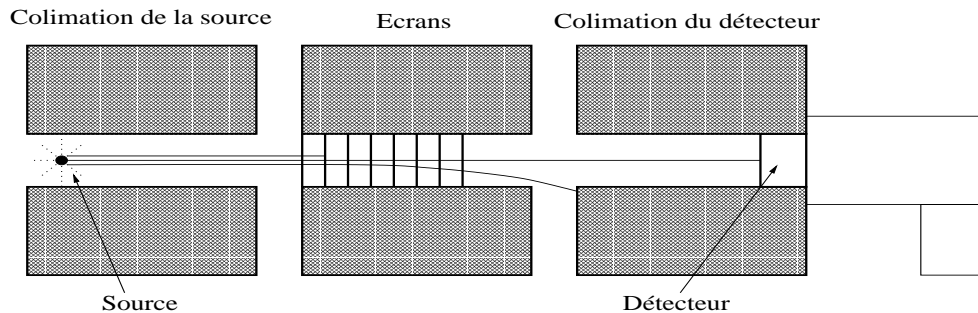


FIG. 3.1: Schéma de collimation

Manipulation

Placer le seuil de discrimination au minimum si la longueur de collimation est supérieure à 25 cm. Sinon, discuter la valeur du seuil à mettre. Relever successivement les courbes d'atténuation du faisceau de photons collimatés pour des écrans d'Aluminium et pour des écrans de Plomb.

Calculs

Tracer les courbes d'atténuation sur un diagramme semi-logarithmique et vérifier qu'elles sont exponentielles. Déterminer les coefficients d'atténuation linéaire du Pb et de l'Al par une droite de régression, ainsi que les erreurs sur ces coefficients. Déduire des valeurs de ces coefficients l'énergie des γ émis par la source à l'aide des planches 6 et 7. Comparer l'énergie trouvée à celle donnée sur le schéma de désintégration.

3.1.3 Questions

1. De deux faisceaux de γ d'énergies différentes, quel est le plus facile à atténuer avec un matériau quelconque ? Quelle est l'épaisseur de Plomb

nécessaire pour atténuer 1000 fois un faisceau de γ à l'énergie où les photons sont les moins atténués?

2. Par quels processus les mesures d'atténuation peuvent-elles être perturbées si la géométrie de l'expérience est quelconque ?
3. Si la source utilisée émet des β , ceux-ci perturbent-ils la mesure ?

3.2 Spectrométrie γ à l'aide d'un détecteur à scintillation

3.2.1 Introduction

Supposons que l'on ait un faisceau de γ monocinétiques, d'énergie $E_\gamma < 2 m_0 c^2$

où $m_0 c^2 = 0.511$ MeV est la masse au repos de l'électron.

Les interactions possibles de ces γ dans le scintillateur sont (figure 3.2, situations 1 et 2) :

1. effet photoélectrique donnant un électron d'énergie $E_e = E_\gamma - E_{liaison}$
2. effet Compton :
l'énergie de l'électron dépend alors de l'angle de diffusion du γ ; elle est comprise entre 0 et une valeur maximale

$$E_{e,max} = \frac{E_\gamma}{1 + \frac{m_0 c^2}{2E_\gamma}} \quad (3.3)$$

La planche 4 donne le coefficient total d'atténuation pour un scintillateur de NaI (Tl) en fonction de l'énergie des γ , ainsi que les contributions respectives de l'effet photoélectrique, de l'effet Compton et de la création de paires à ce coefficient.

Comme le signal de détection d'anode du photomultiplicateur a, dans notre montage, une amplitude V proportionnelle à l'énergie perdue par la (ou les) particule(s) chargée(s) dans le scintillateur, le spectre donnant le nombre de γ détectés ayant produit une impulsion d'amplitude comprise entre V et $V + \Delta V$ devrait avoir la forme suivante :

Les phénomènes suivants vont modifier l'aspect du spectre :

1. Les diffusions multiples des γ : les γ diffusés par effet Compton peuvent subir de nouvelles interactions dans le scintillateur.
2. Lors d'un effet photoélectrique, l'énergie du X de réarrangement (28.5 KeV environ après un effet photoélectrique sur la couche K de l'Iode du NaI) est en général réabsorbée dans le cristal par des effets photoélectriques successifs : le pic photoélectrique correspond finalement à l'énergie E . Cependant, lorsque l'énergie du γ est proche de l'énergie correspondante au "saut K " du coefficient d'atténuation (33,17 KeV) (planche 4), la probabilité qu'a le γ d'interagir près de la face d'entrée

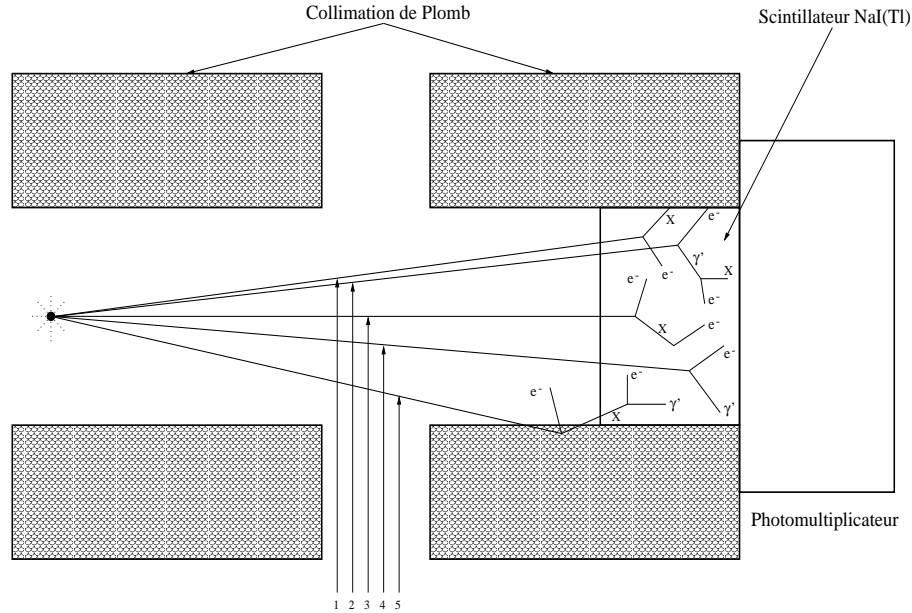


FIG. 3.2: Interactions des γ d'énergie inférieure à 1.022 MeV dans le scintillateur NaI(Tl)

- 1 : Effet photoélectrique
- 2 : Effet photoélectrique avec réabsorption du rayon X de réarrangement
- 3 : Effet Compton
- 4 : Effet Compton avec réabsorption du γ' diffusé
- 5 : Effet photoélectrique du γ dans la collimation, suivi de l'absorption dans le NaI du rayon X de réarrangement.

du cristal est grande et, dans ce cas, celle du X de réarrangement de s'échapper aussi. Le pic associé à ce phénomène, appelé "pic d'échappement", correspond à l'énergie $E = E_\gamma - E_{X\text{réarrangement}}$.

3. Contribution parasite due aux photons diffusés dans le milieu entourant le scintillateur (cet effet peut être diminué en utilisant une collimation appropriée).
4. Enfin, la résolution en énergie du détecteur à scintillations.

Nous avons donné l'allure du spectre pour un faisceau de γ monocinétiques. Le spectre relevé contiendra en réalité des contributions dues à toutes les autres radiations qui sont capables de parvenir dans le cristal de NaI : X de conversion interne, photons d'annihilation de β^+ émis, etc...

On se reportera aux schémas de désintégration pour l'interprétation des spectres.

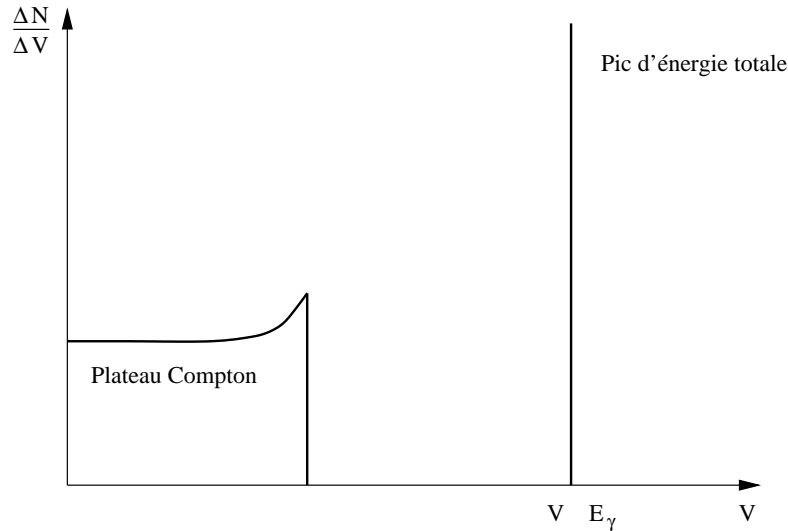


FIG. 3.3: Spectre idéal de l'effet Compton et de l'effet photoélectrique

Complément : Le coefficient μ d'atténuation linéaire des γ dans un **scintillateur plastique** généralement utilisé pour la détection des particules chargées est donné à la planche 5. On remarque qu'au dessus de 30 keV, l'effet photoélectrique dans ce type de scintillateur est négligeable : les spectres ne présenteront que le "plateau Compton" entre 30 keV et quelques MeV. On remarque également que le coefficient d'atténuation μ pour le scintillateur plastique est environ de un à deux ordres de grandeur plus petit que celui du NaI entre 10 keV et 10 MeV.

Addendum : Calcul des **probabilités de détection**. La probabilité de détection p d'une particule émise par une source s'écrit, à l'approximation d'un faisceau parallèle :

$$p = \frac{\Omega}{4\pi} \cdot e \cdot f \cdot a \quad (3.4)$$

où

- Ω = angle solide du détecteur vu de la source
- e = efficacité du détecteur à ces particules
- f = fraction du spectre au dessus du seuil de discrimination
- a = fraction du faisceau non atténué entre la source et le détecteur.

Dans le cas d'un faisceau non parallèle de γ tombant sur un cristal de NaI de 1" de diamètre et d'épaisseur, la fonction p/fa est reportée à la planche 8 pour différentes distances source-face avant du cristal.

On obtiendra un spectre de la forme :

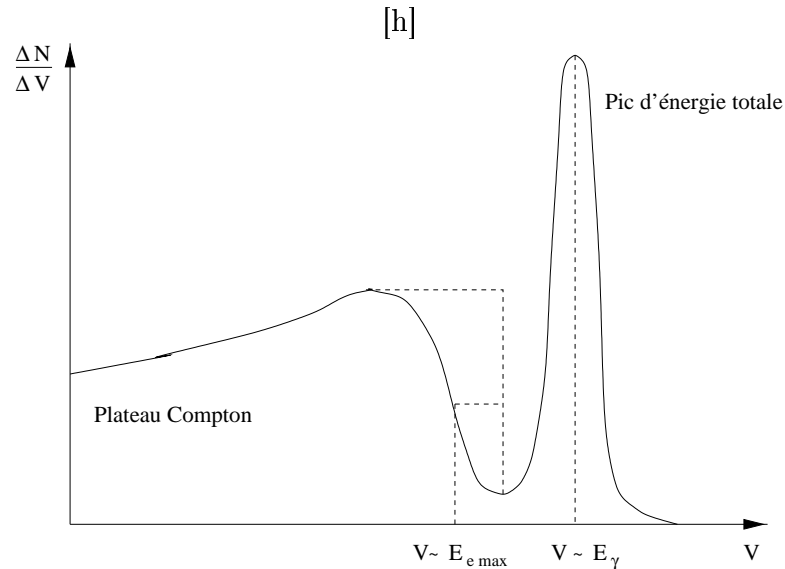


FIG. 3.4: Spectre réaliste de l'effet Compton et de l'effet photoélectrique

3.2.2 Expérience

Le montage expérimental comprend un détecteur à scintillations équipé d'un cristal de NaI(Tl), une collimation de plomb de 25 cm, un amplificateur et un analyseur multicanal. Après amplification, les impulsions seront analysées et enregistrées par l'analyseur.

La manipulation consiste à :

1. Relever le spectre différentiel de plusieurs des sources suivantes : ^{210}Pb , ^{57}Co , ^{241}Am , ^{137}Cs , ^{22}Na , ^{203}Hg et ^{60}Co et à donner l'origine des pics observés.
2. Déterminer l'amplitude des impulsions correspondant aux centres de gravité de ces différents pics.
3. Vérifier que la chaîne de détection est linéaire en reportant sur un graphique l'amplitude des différents pics et, éventuellement, sauts Compton, en fonction de l'énergie correspondante.
4. Calculer les résolutions σ_E/E de quelques pics d'énergies bien différentes et de les comparer aux valeurs attendues en utilisant la relation donnée à la page C.I-12.

Vérifier la dépendance en $\frac{1}{\sqrt{E}}$ de la résolution en reportant sur un graphique σ_E/E en fonction de $(E)^{-1/2}$.

3.2. SPECTROMÉTRIE γ À L'AIDE D'UN DÉTECTEUR À SCINTILLATION 27

5. Relever et interpréter le spectre du radioélément qui sera utilisé dans l'expérience finale et dont le schéma de désintégration est donné au chapitre qui s'y rapporte.

3.2.3 Questions

1. Comment varie, qualitativement, la forme d'un spectre avec l'énergie des photons? Comparer les spectres relevés.
2. Quelle est la modification du spectre qu'entraînent les photons diffusés par effet Compton dans le milieu entourant le cristal? Comment réduire l'importance de ces diffusions tout en évitant de détecter les X de réarrangement issus de la collimation? Comparer les spectres du ^{137}Cs relevés avec et sans collimation de plomb.
3. Quelles sont les efficacités d'un cristal de NaI et d'un plastique scintillant NE102A de 1" d'épaisseur (2.54 cm) pour un faisceau de photons parallèle de 0.66 MeV du ^{137}Cs ?

Chapitre 4

Les coïncidences

4.1 Généralités sur les coïncidences

4.1.1 Le sélecteur de coïncidences

Considérons un montage tel que celui dessiné ci-après :
Le sélecteur de coïncidences est un circuit qui comprend 2 entrées ou plus.

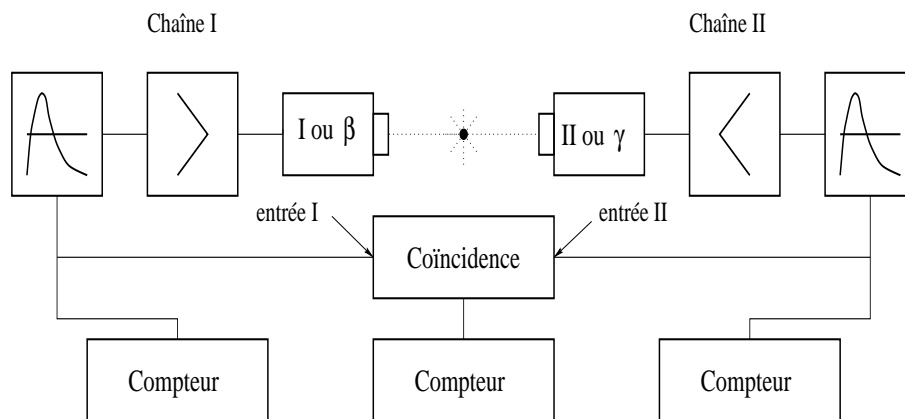
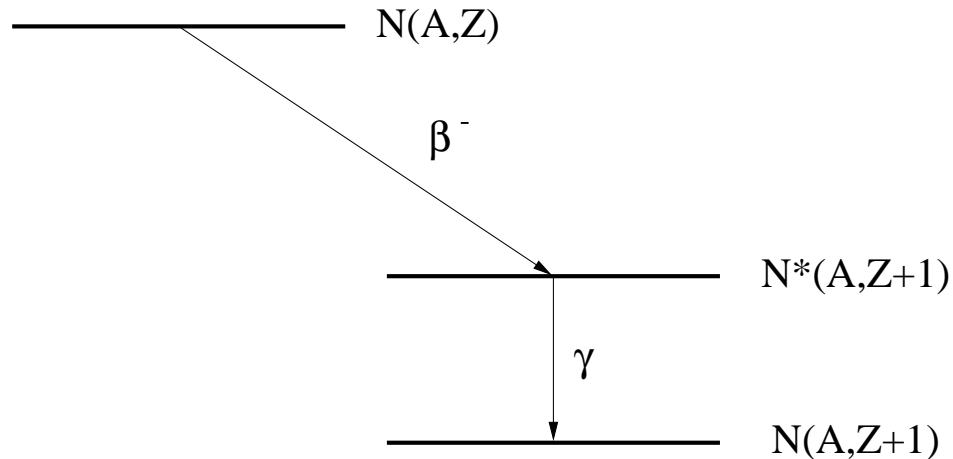


FIG. 4.1: Montage expérimental pour les coïncidences

Il délivre un signal de sortie logique chaque fois qu'arrivent "simultanément" des impulsions logiques à ses entrées (voir fig. 4.3). Les circuits utilisés en pratique délivrent un signal de sortie lorsqu'il y a recouvrement temporel des impulsions à l'entrée. On peut, en général, choisir la durée de l'impulsion de sortie égale soit à la durée du recouvrement (durée variable), soit à une durée fixe arbitraire. On définit le temps de résolution, 2θ , du sélecteur de coïncidences comme l'intervalle de temps maximum séparant deux impulsions

FIG. 4.2: Désintégration produisant un β^-

produisant encore un signal de coïncidence. Ce temps de résolution (à ne pas confondre avec celui décrit dans le paragraphe N.G.-3.9) dépend évidemment de la largeur des impulsions d'entrée et vaut :

$$2\theta = \theta_1 + \theta_2 \quad (4.1)$$

Les sélecteurs sont parfois munis d'une entrée dite d'anticoïncidence. Un tel circuit ne délivrera une impulsion de sortie que lors de la présence simultanée d'impulsions sur les entrées de coïncidence et de l'absence d'impulsion sur l'entrée d'anticoïncidence.

4.1.2 Les types de coïncidences

Si, dans l'exemple de la figure M.VI-2, la source émet deux rayonnements en cascade, la période de l'état intermédiaire $N^*(A, Z+1)$ étant extrêmement brève par rapport au temps de résolution du sélecteur de coïncidences, on peut alors distinguer parmi les impulsions en coïncidence (fig. 4.3) :

- a) les coïncidences vraies :
Elles résultent de la détection par chacun des compteurs I et II d'une des deux particules produites dans une **même désintégration** et, par conséquent, ayant une corrélation en temps.
- b) les coïncidences vraies de bruit de fond :
Par exemple, celles produites par les gerbes du rayonnement cosmique.
- c) les coïncidences fortuites (cas A et B de la fig. 4.3) : Elles résultent de la présence, par hasard, dans un intervalle de temps inférieur au temps

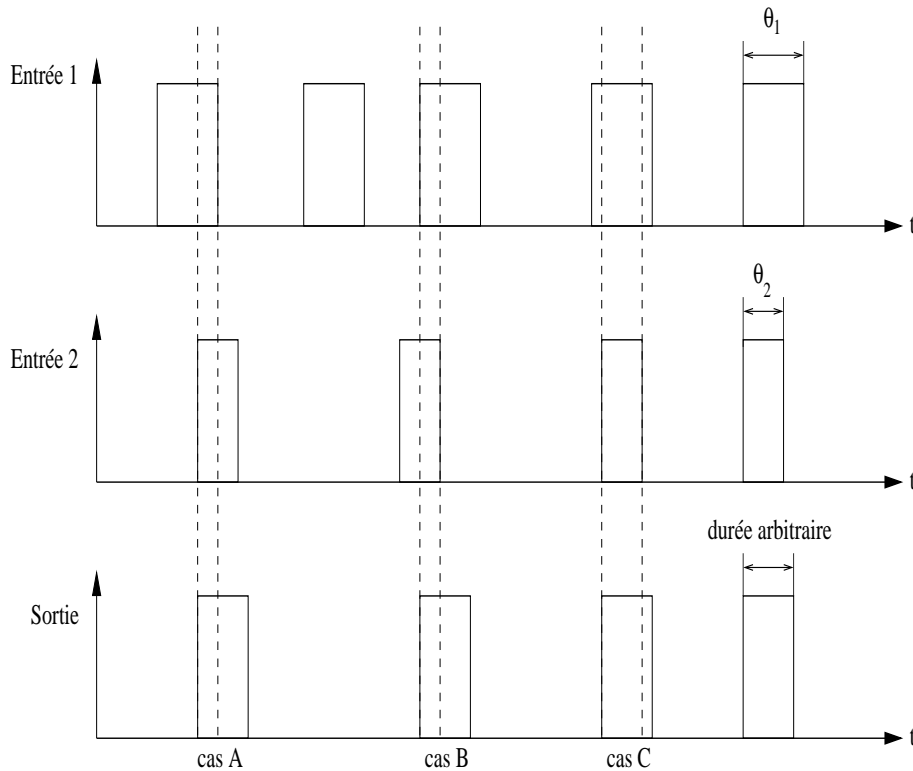


FIG. 4.3: Les cas de coïncidences

de résolution, d'une impulsion à chacune des deux entrées du sélecteur. Le terme "par hasard" signifie que ces deux impulsions n'ont pas de corrélation et proviennent de la détection par chaque compteur d'une particule émise lors de **deux désintégrations différentes**.

d) les coïncidences parasites :

Elles résultent de la détection par les deux compteurs d'une même particule diffusant de l'un dans l'autre.

Les coïncidences fortuites

Si les impulsions aux entrées 1 et 2 du sélecteur de coïncidences se présentent selon deux processus poissonniens stationnaires indépendants, le taux de coïncidences **fortuites** est :

$$m_f = 2\theta m_1 m_2 \quad (4.2)$$

où m_1, m_2 désignent respectivement les taux d'impulsions sur les voies 1 et 2. En effet, la probabilité qu'une impulsion de durée θ_2 quelconque, dans

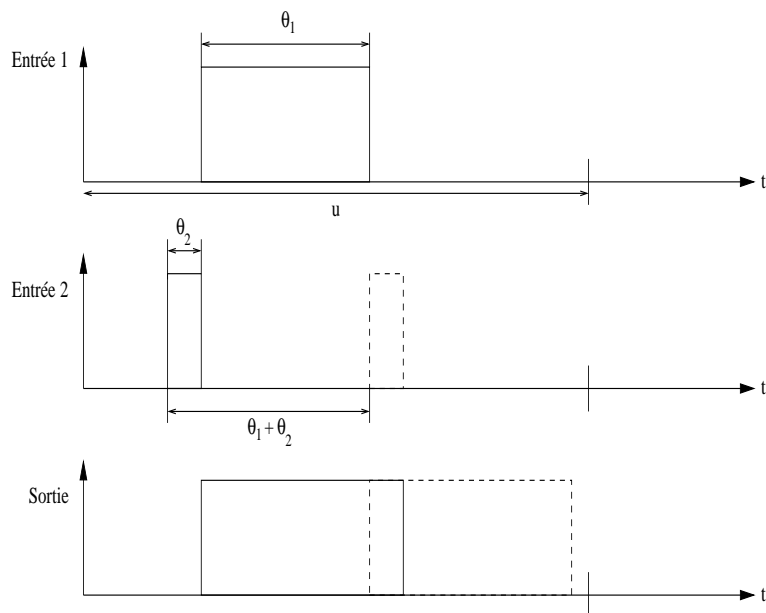


FIG. 4.4: Le taux de coïncidences fortuites

l'unité de temps u , recouvre l'impulsion de durée θ_1 vaut $(\theta_1 + \theta_2)/u$. Donc, finalement, pour m_1 impulsions de durée θ_1 et m_2 impulsions de durée θ_2 , le taux de coïncidences fortuites sera :

$$m_1 m_2 u \frac{\theta_1 + \theta_2}{u} = m_1 m_2 (\theta_1 + \theta_2) = 2\theta m_1 m_2 \quad (4.3)$$

les coïncidences vraies

Lors de toute mesure de coïncidence, le taux de **coïncidences mesurées** m_m est la somme du taux de coïncidences vraies m_v et du taux de coïncidences fortuites m_f :

$$m_m = m_v + m_f \quad (4.4)$$

Le taux m_v lui-même est la somme du taux de coïncidences vraies liées au phénomène étudié, m_e , et du taux de coïncidences vraies dues aux rayonnements cosmiques, m_c :

$$m_v = m_e + m_c \quad (4.5)$$

Il vient donc : $m_e = m_m - m_c - m_f$

Désignons par m_1 et m_2 les taux mesures sur les voies d'entrée du sélecteur de

coïncidences. Les taux d'événements sans corrélation aux entrées sont donc :

$$m_1 - m_v \quad \text{et} \quad m_2 - m_v \quad (4.6)$$

et, par conséquent. le taux de coïncidences fortuites sera :

$$m_f = 2\theta (m_1 - m_v) (m_2 - m_v) \quad (4.7)$$

On obtient ainsi une équation du 2ème degré pour le taux m_e

$$m_e = m_m - m_c - 2\theta \cdot [m_1 - (m_e + m_c)] \cdot [m_2 - (m_e + m_c)] \quad (4.8)$$

Le taux de coïncidences vraies ($m_e + m_c$) est presque toujours négligeable devant les taux m_1 et m_2 de chaque voie d'entrée, si bien que l'équation précédente se simplifie :

$$m_e = m_m - m_c - 2\theta \cdot m_1 \cdot m_2 \quad (4.9)$$

On mesure donc séparément m_1, m_2, m_m et m_c , ce qui permet de déterminer m_e . Le temps de résolution 2θ doit être déterminé par une mesure annexe s'il n'est pas connu.

Correction des pertes dues aux temps de résolution des systèmes de détection

Soit n_1 et n_2 le nombre d'événements ionisants produits par seconde dans les détecteurs 1 et 2 et τ_1 et τ_2 les temps de résolution des deux chaînes de détection avant les compteurs d'impulsions dont les temps de résolution sont supposés être inférieurs à ceux des appareils précédents. Un certain nombre de coïncidences vraies ne seront plus détectées puisqu'il y a perte d'impulsions avant le sélecteur. On a les relations :

$$\begin{aligned} n_1 &= \frac{m_1}{1 - m_1 \cdot \tau_1} & n_2 &= \frac{m_2}{1 - m_2 \cdot \tau_2} \\ n_v &= \frac{m_v}{(1 - m_1 \cdot \tau_1) \cdot (1 - m_2 \cdot \tau_2)} \end{aligned} \quad (4.10)$$

$$\text{avec } m_v = m_m - 2\theta \cdot m_1 \cdot m_2$$

$$n_e = n_v - n_c$$

$$\text{et } n_c \cong m_c \quad \text{car } m_{1c}\tau_1 \text{ et } m_{2c}\tau_2 \ll 1$$

On effectue cette correction seulement si $m_1\tau_1$ et $m_2\tau_2$ ne sont pas négligeables devant l'unité, compte tenu de la précision voulue sur le taux n_e .

Élimination des coïncidences parasites.

Les coïncidences parasites, dues à la diffusion d'une même particule d'un détecteur à l'autre, peuvent être éliminées :

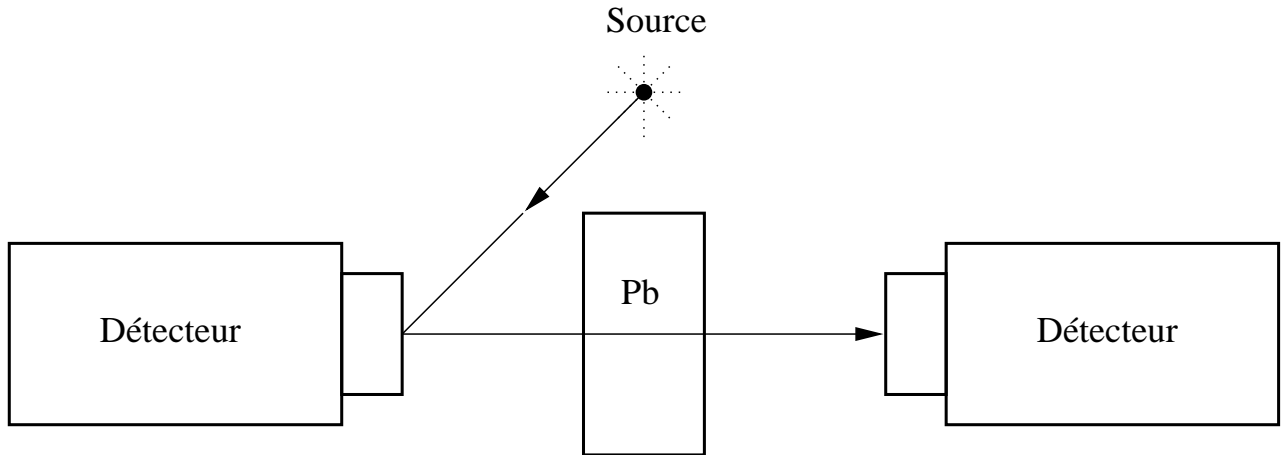


FIG. 4.5: Diffusion parasite

- en intercalant un écran entre les deux détecteurs
- ou en montant le seuil de discrimination d'un des détecteurs de telle manière que la particule, après diffusion sur l'autre détecteur, n'ait plus l'énergie suffisante pour être enregistrée.

4.1.3 Relation entre coïncidences vraies et coïncidences fortuites.

Les différents taux de comptage pour le dispositif de la fig. 4.1 employant la source dont le schéma de désintégration est représenté à la figure 4.2, sont donnés par :

$$\begin{array}{ll}
 \text{détecteur de } \beta & : m_{\beta} = A p_{\beta} \\
 \text{détecteur de } \gamma & : m_{\gamma} = A p_{\gamma} \\
 \text{coïncidences vraies} & : m_{\beta\gamma} = A p_{\beta} p_{\gamma} \\
 \text{coïncidences fortuites} & : m_f = 2\theta m_{\beta} m_{\gamma} = 2\theta A^2 p_{\beta} p_{\gamma}
 \end{array}$$

où

A =activité de la source (désintégrations/seconde)
 p_{β} (ou p_{γ})=probabilité de détection d'un β (respectivement γ) uniquement par le détecteur de β (resp. γ)

Le rapport des coïncidences fortuites aux coïncidences vraies est donc :

$$\frac{m_f}{m_{\beta\gamma}} = 2\theta A \quad (4.11)$$

Cette expression montre qu'il y a avantage à prendre 2θ petit. Une fois 2θ fixé, il est en général préférable de choisir une activité de source plutôt faible et une probabilité de détection grande (grand angle solide, c.à.d détecteur près de la source,...) plutôt que l'inverse. Pour de mêmes valeurs des taux simples m_β et m_γ et du taux de coïncidences fortuites m_f , le taux de coïncidences vraies est augmenté et sa précision statistique de mesure est meilleure. On s'arrange en général pour que $m_f/m_{\beta\gamma}$ soit inférieur à quelques pourcents.

Les 3 équations à 3 inconnues $m_\beta = A p_\beta$, $m_\gamma = A p_\gamma$ et $m_{\beta\gamma} = A p_\beta p_\gamma$ permettent d'obtenir **l'activité de la source** :

$$A = \frac{m_\beta m_\gamma}{m_{\beta\gamma}} \quad (4.12)$$

On peut alors déterminer **les probabilités de détection** par :

$$p_\gamma = \frac{m_\gamma}{A} \quad \text{et} \quad p_\beta = \frac{m_\beta}{A} \quad (4.13)$$

4.2 Expérience

4.2.1 Mesure du temps de résolution d'un sélecteur de coïncidences

Les impulsions aux entrées du sélecteur sont fournies par deux détecteurs de particules disposés et irradiés par deux sources indépendantes, de sorte que les impulsions sur chaque voie soient distribuées selon des processus de Poisson stationnaires sans corrélation entre eux (fig. 4.5).

Le taux moyen de coïncidences mesure m_m sera :

$$m_m = 2\theta m_1 m_2 + m_c \quad (4.14)$$

En reportant sur un graphique m_m en fonction du produit $m_1 m_2$, on obtient une droite dont la pente est 2θ .

Avec deux sources quelconques, déterminer le temps de résolution du sélecteur de coïncidences. Choisir la géométrie et les seuils de détection en les justifiant. Comparer le résultat obtenu avec la somme des durées des impulsions $\theta_1 + \theta_2$ mesurées à l'oscilloscope. Expliquer, s'il y a lieu, les éventuelles différences entre ces 2 résultats.

4.2.2 Calibration (mesure de l'activité) d'une source de ^{60}Co

Application de la méthode exposée au § N.G.-2.3

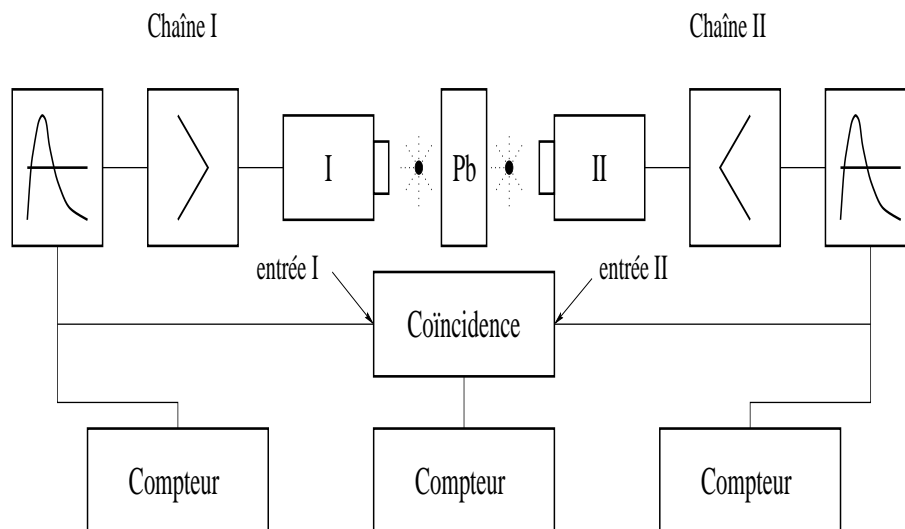


FIG. 4.6: Montage pour la détermination des coïncidences fortuites

La désintégration du ^{60}Co produit un rayonnement β^- de 0.314 MeV et deux raies γ de 1.17 et 1.33 MeV selon le schéma de la figure 4.6.

Quel que soit le type de détecteur à scintillation à disposition (cristal de NaI ou plastique NE 102A), on élimine la détection des β^- en plaçant un écran d'aluminium de plus de 80 mg/cm^2 entre la source et le scintillateur ($R_{max}(E_\beta = 0,314 \text{ MeV}) = 80 \text{ mg/cm}^2$). (Le groupe effectuant l'expérience V remplace, pour cette manipulation, le détecteur à semiconducteur par un détecteur à scintillation à cristal de NaI).

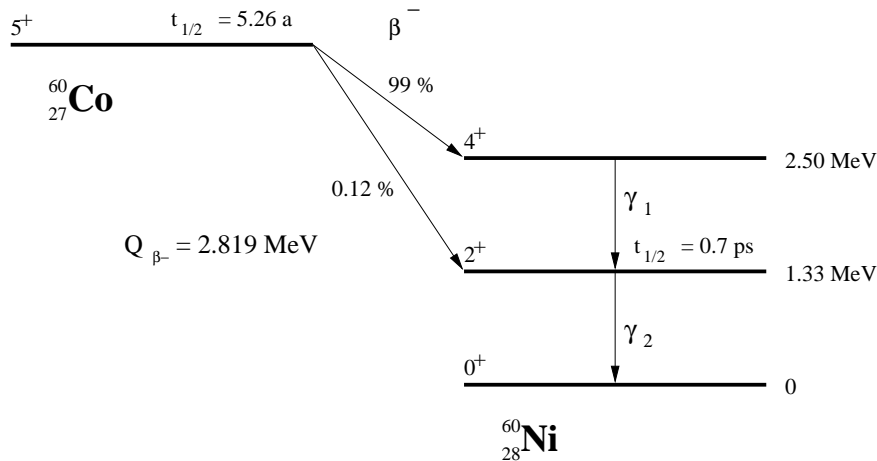
Les énergies des γ_1 et γ_2 étant voisines, on peut considérer que leurs probabilités de détection, pour un détecteur donné, sont identiques. Montrer alors que les taux de comptage sur les détecteurs I et II ainsi que le taux de coïncidences vraies s'écrivent :

$$\begin{aligned} m_I &= 2 A P_I \\ m_{II} &= 2 A P_{II} \\ m_V &= 2 A P_I P_{II} \end{aligned}$$

où P_I et P_{II} sont les probabilités de détection des γ_1 et γ_2 par les détecteurs I et II.

Il vient alors :

$$\begin{aligned} A &= \frac{m_I m_{II}}{2m_V} \\ m_f &= 8\theta A^2 P_I P_{II} \\ \frac{m_f}{m_V} &= 4\theta A \end{aligned}$$

FIG. 4.7: Schéma de désintégration du ^{60}Co

Assembler et régler la deuxième chaîne de spectrométrie si cela n'a pas été déjà fait lors des manipulations précédentes.

Déterminer la géométrie de l'expérience et les seuils de discrimination. En justifier les choix.

Prendre une source de ^{60}Co dont l'activité est appropriée (cf. § N.G.-2.3) à une mesure avec le montage expérimental à disposition. Contrôler à l'oscilloscope, avant d'effectuer les mesures, que les deux impulsions correspondant aux détections des deux γ simultanés se recouvrent bien (c.à.d qu'il n'y a pas de retard d'une chaîne de détection sur l'autre).

Déterminer l'activité de la source de ^{60}Co en utilisant la relation 4.12. Comparer votre résultat à la valeur nominale indiquée de l'activité et expliquer, s'il y a lieu, l'origine de l'éventuelle différence (le taux de coïncidences vraies intervenant dans ce calcul devra être déterminé selon les relations du paragraphe 4.1.3).

Une fois connue l'activité de la source, déterminer les probabilités de détection des deux γ et comparer ces résultats aux probabilités calculées (Eq. 3.4).

Chapitre 5

L'expérience IX

5.1 Introduction

L'expérience IX a pour but d'étudier la désintégration du ^{57}Co . Pour arriver à cette étude, plusieurs manipulations intermédiaires ont été nécessaires pour comprendre le matériel et les techniques employées. On va maintenant utiliser ce que l'on a étudié dans les chapitres précédents.

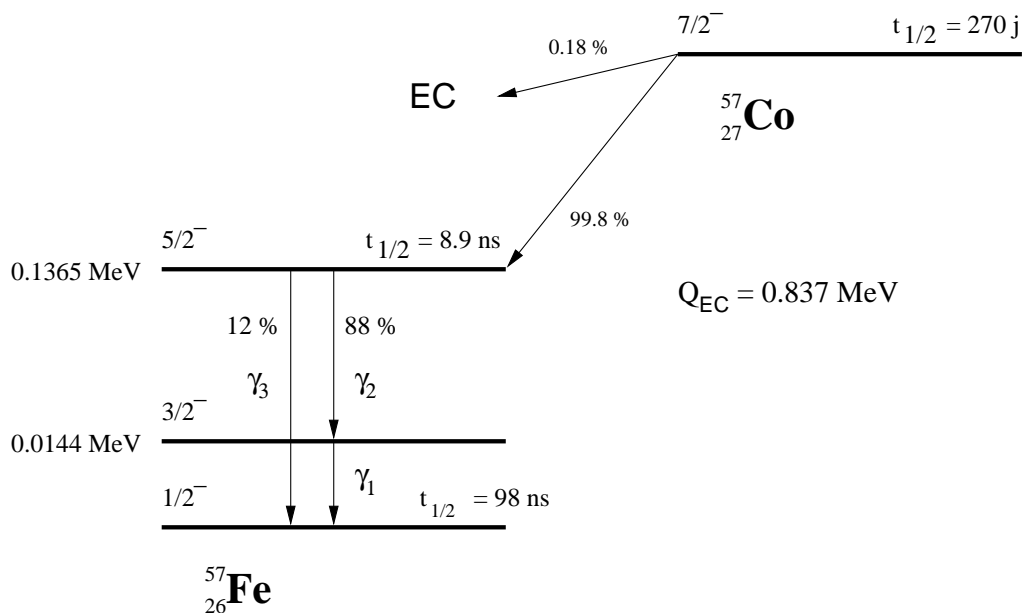
5.2 Le schéma de désintégration du Cobalt 57

Le cobalt 57 a la particularité d'émettre des photons en cascades successives. C'est ce phénomène que l'on va mettre en évidence. Ce schéma est décrit dans le premier chapitre. Il montre comment un atome de Cobalt se transforme par capture électronique en un atome de Fer.

5.3 But

En recherche, la connaissance du schéma de désintégration permet de distinguer entre différents modèles théoriques du noyau qui prédisent les niveaux d'énergie et leur période ; en particulier la période d'un niveau, quand elle est mesurable, renseigne sur le mode d'excitation (excitation d'un seul ou de plusieurs nucléons). On va donc s'attacher à mettre en évidence quelques caractéristiques du schéma précédent et l'expérience consiste à

- dénombrer les raies γ_i et à montrer que γ_1 et γ_2 sont en cascade
- à déterminer les énergies des trois raies γ
- mesurer l'activité de la source à disposition.

FIG. 5.1: Schéma de désintégration du ^{57}Co

5.4 Principe de l'expérience

Pour mettre en évidence la corrélation temporelle entre 2 raies γ_1 et γ_2 comme pour mesurer l'activité de la source à disposition, la méthode à utiliser est celle des coïncidences (Chapitre 3).

On prendra donc 2 chaînes de spectrométrie pour γ en coïncidences (fig 5.2). la première est équipée d'un compteur proportionnel a xénon, la seconde d'un cristal de NaI standard.

L'emploi du compteur proportionnel à xénon est rendu possible par la faible énergie de la raie γ_1 qui serait entièrement atténuée par la fenêtre d'un cristal standard (se reporter aux caractéristiques techniques, ainsi qu'à la planche ?? de la notice générale pour connaître le domaine d'énergie à laquelle ce compteur est sensible).

Par contre, avoir recours à un tel compteur pour détecter les raies γ_2 et γ_3 n'est pas envisageable : pour des rayonnements de grande énergie, le compteur proportionnel devient inefficace. On lui préfère le cristall scintillant NaI qui a un haut coefficient d'absorption pour le rayonnement γ .

En résumé, on utilisera le détecteur 1 (Xe) pour observer les photons γ_1 et le détecteur 2 pour les deux photons de plus grande énergie γ_2 et γ_3 .

Dénombrer les raies γ à partir du spectre d'énergie délivré par nos chaînes de spectrométrie n'est pas possible. La résolution en énergie est trop faible

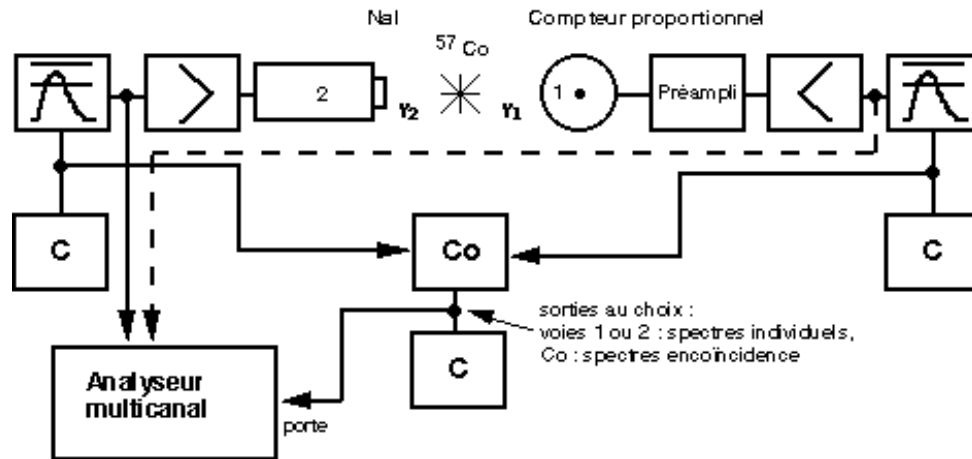


FIG. 5.2: Schéma de montage de l'expérience

pour faire ressortir la raie γ_3 de faible intensité (11%) du pic correspondant à la raie γ_2 de forte intensité (85%). Pour dénombrer les raies et montrer que les raies γ_1 et γ_2 sont en cascade, on n'enregistre les γ détectés dans le cristal 2 que si le γ a été détecté dans le compteur 1.

Par commodité, on emploie un analyseur multicanal dont la porte est ouverte par la coïncidence entre les détecteurs 1 et 2. Les γ_1 sont sélectionnés dans la chaîne 1 en plaçant la fenêtre de l'analyseur de bande sur le pic d'énergie totale correspondant. Si les raies γ_1 et γ_2 sont en cascade, on doit obtenir des coïncidences entre les détecteurs 1 et 2. Le spectre en énergie faisant apparaître les γ_3 est obtenu en soustrayant d'un spectre total obtenu du cristal 2 le spectre des γ_2 mesuré en coïncidence avec le γ_1 . Le nombre des γ_2 de ces deux spectres doit être le même. Cette normalisation des deux spectres se fait au mieux sur le flanc gauche du pic d'énergie totale du spectre total, flanc dû essentiellement aux γ_2 .

Les énergies des γ_2 et γ_3 sont alors simplement déduites de l'étalonnage en énergie du détecteur 2 effectué avec d'autres sources (voir section 3.2). L'énergie du γ_1 s'obtient de la même façon à partir du spectre délivré par le détecteur 1.

5.5 Conditions d'expérience et marche à suivre

La géométrie de détection est la suivante (valeurs indicatives à contrôler) :

Attention ! La fenêtre du compteur proportionnel est très mince. Le moindre choc peut la décoller et rendre le compteur hors d'usage. Pour augmenter la

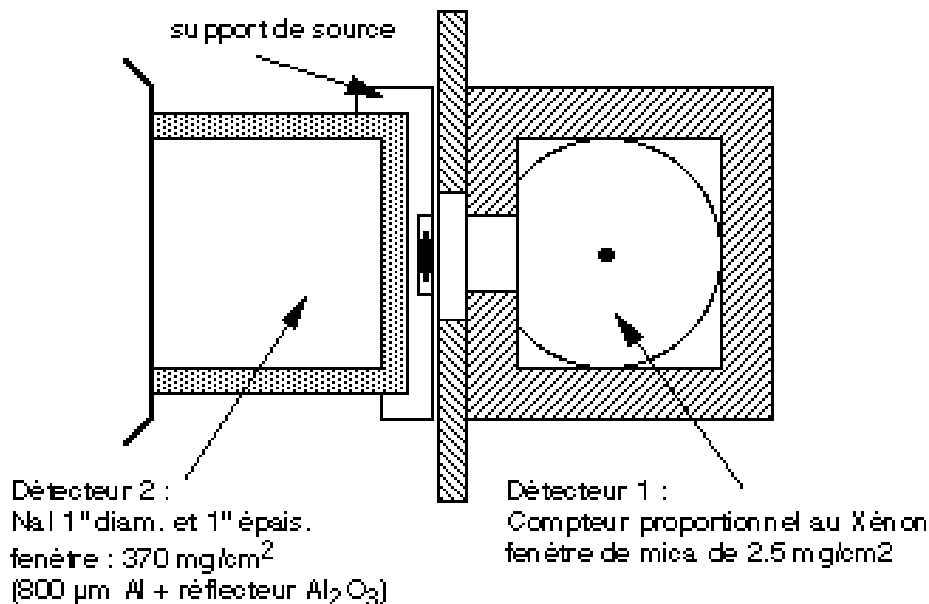


FIG. 5.3: Schéma de montage des détecteurs NaI et Xe

précision statistique sur les coïncidences vraies (cf section 4.1.3 du chapitre 4), on enferme la source entre les 2 détecteurs.

5.5.1 Observation des spectres

On relève, pour commencer, le spectre d'énergie des γ pour chaque détecteur en prenant soin d'obtenir avec le détecteur 1 le pic d'énergie totale des γ_1 de 14.4 KeV et même celui des X de 6.4 KeV. On place ensuite la fenêtre de l'analyseur du détecteur 1 sur le pic d'énergie totale des γ_1 . On relève avec le détecteur 2 le spectre d'énergie des γ_2 en coïncidence avec les γ_1 sélectionnés par le détecteur 1.

Compte-tenu de la distribution des intervalles de temps entre γ_2 et γ_1 , le taux des coïncidences mesurées avec un temps de résolution $2\theta = \theta_1 + \theta_2$ le sera avec une probabilité

$$f(\theta_2) = \int_0^{\theta_2} \frac{1}{\tau} \exp\left(-\frac{t_{\gamma_1\gamma_2}}{\tau}\right) dt_{\gamma_1\gamma_2}$$

si les retards sur chacune des voies jusqu'à la coïncidence sont identiques. S'assurer que θ_2 est tel que $f \cong 1$.

Par ailleurs, la résolution temporelle du compteur proportionnel utilisé en détecteur de photons n'est pas négligeable. On s'assurera également à

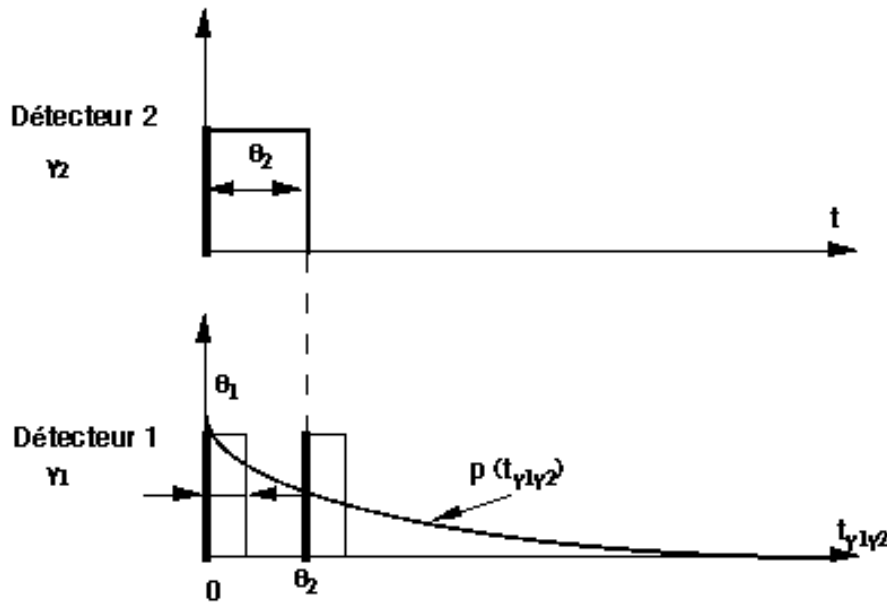


FIG. 5.4: Distribution temporelle entre 2 événements

l'oscilloscope que le cadrage temporel des impulsions de détection des γ_1 et γ_2 n'entraîne pas de perte de coïncidences.

Expliquer l'origine des pics observés sur les spectres obtenus avec les deux détecteurs. Déduire des deux spectres relevés avec le détecteur 2 celui correspondant à la raie γ_3 . Déterminer les énergies des 3 raies γ et les comparer à celles données sur le schéma de désintégration.

5.5.2 Mesure de l'activité de la source

En sélectionnant le pic correspondant à la raie γ_1 sur le détecteur 1 et en plaçant le seuil inférieur du discriminateur de le détecteur 2 au-dessus du bruit de fond, on aura les taux de comptage suivants :

- détecteur 1 :

$$m_1 = A\alpha p_1$$

où p_1 est la probabilité de détecter γ sur le détecteur 1 et α , le facteur d'embranchement de la voie γ_2 et γ_1 (88%); cette probabilité inclut également la non-conversion de ce γ_1 . Elle exclut cependant la détection des γ_2 et γ_3 puisque la fenêtre de l'analyseur de bande a été placée sur le pic de 14.4 KeV.

- détecteur 2 :

$$m_2 = A(1 - \alpha)p_3 + A\alpha p_2$$

où p_2 et p_3 sont les probabilités de détecter des γ_2 et γ_3 sur le détecteur 2. Les γ_1 ne sont pas détectés car ils sont complètement atténués par la fenêtre du cristal de NaI.

- coïncidences vraies :

$$m_{12} = A\alpha p_1 p_2 \quad \text{si } f \cong 1$$

On peut alors calculer l'activité de la source

$$\frac{m_1 m_2}{m_{12}} = A(1 - \alpha) \frac{p_3}{p_2} + A\alpha \cong A$$

car $p_2 \cong p_3$ puisque les énergies des γ_2 et γ_3 sont assez proches et que les facteurs de conversion sont négligeables.

- coïncidences fortuites :

$$m_f = 2\theta m_1 m_2 = 2\theta [A(1 - \alpha)p_3 + A\alpha p_2] A\alpha p_1$$

On trouve donc le rapport des coïncidences fortuites aux vraies

$$\frac{m_f}{m_{12}} = 2\theta \left[A(1 - \alpha) \frac{p_3}{p_2} + A\alpha \right] \cong 2\theta A$$

L'activité de la source, qui a dû être choisie au préalable pour cette expérience, est de l'ordre de $1 \mu\text{Ci}$.

Ainsi, si $A = 1 \mu\text{Ci}$ et $2\theta = 1 \mu\text{s}$, $3,7 \%$. Mesurer l'activité de la source en tenant compte des coïncidences fortuites (cf. chapitre 4). Montrer que les coïncidences parasites sont négligeables.

5.6 Questions

1. Expliquer le principe de fonctionnement du compteur proportionnel en détecteur de photons.
2. Quels sont les facteurs qui détériorent la résolution temporelle d'un compteur proportionnel et d'un compteur proportionnel détectant des photons ?
3. Dans l'expérience VI (étude du schéma de désintégration du ^{57}Co), on mesure également la période du niveau de 14.4 KeV du ^{57}Fe . Quelle est la raison pour laquelle cette mesure ne peut-elle être effectuée dans cette expérience ?

Table des figures

1	Schéma de désintégration du ^{57}Co	iv
1.1	figure de montage	2
1.2	Synchronisation de la porte et de la voie analogique	4
1.3	Interactions des γ d'énergie inférieure à 1.022 MeV dans le scintillateur NaI(Tl)	8
1.4	Spectre idéal de l'effet Compton et de l'effet photoélectrique	9
1.5	Spectre réaliste de l'effet Compton et de l'effet photoélectrique	10
2.1	Histogramme de l'ensemble des mesures	13
3.1	Schéma de collimation	21
3.2	Interactions des γ d'énergie inférieure à 1.022 MeV dans le scintillateur NaI(Tl)	24
3.3	Spectre idéal de l'effet Compton et de l'effet photoélectrique	25
3.4	Spectre réaliste de l'effet Compton et de l'effet photoélectrique	26
4.1	Montage expérimental pour les coïncidences	29
4.2	Désintégration produisant un β^-	30
4.3	Les cas de coïncidences	31
4.4	Le taux de coïncidences fortuites	32
4.5	Diffusion parasite	34
4.6	Montage pour la détermination des coïncidences fortuites	36
4.7	Schéma de désintégration du ^{60}Co	37
5.1	Schéma de désintégration du ^{57}Co	40
5.2	Schéma de montage de l'expérience	41
5.3	Schéma de montage des détecteurs NaI et Xe	42
5.4	Distribution temporelle entre 2 événements	43