Compteur Geiger

Département de Physique, Université de Fribourg

Romain De Groote

23 octobre 2025

1 Introduction

La radioactivité est un vaste domaine ayant débuté tardivement dans l'histoire de la physique. Les premiers travaux remontant au XIXe siècle, avec la découverte des rayons X. Durant le XXe siècle, les pionners de ce nouveau pan de la physique furent Marie et Pierre Curie, qui découvrirent de nombreux nouveaux éléments radioactifs, au péril de leur santé. Près d'un siècle plus tard, après une phase où la radioactivité était à la mode entre la fin du XIXe et le milieu du XXe siècle, le largarge de 2 bombes nucléaires sur la population et 2 terribles catastrophes dans des centrales, l'effet sur la santé n'est plus à démontrer. Les radiations sont néfastes et une longue exposition à ces dernières peut engendrer moulte problèmes telle que des cancers. Il est donc primordial de limiter au maximum l'exposition aux radiations. Pour ce faire, les spécialistes travaillant dans des milieux à risques (centrales nucléaires, avion de ligne, ...) utilise un appareil dont la première version fut mise au point par Hans Geiger et son assitant Walther Müller, un tel appareil est appelé un compteur Geiger-Müller. Il mesure la quantité de radiations auxquelles une personne est exposée, cela permet de s'assurer que cette dernière ne dépasse pas les limites fixées par les autorités sanitaires.

2 But de l'expérience

L'objectif de cette expérience est de se familiariser avec le fonctionnement d'un compteur Geiger-Müller et d'étudier la désintégration radioactive du ^{137}Cs. Ce dernier emet des rayonnement β et γ, c'est-à-dire des électrons et des photons de hautes énergies. De plus on verra les limites physiques du compteur Geiger-Müller, notamment son temps mort τ_d. On étudiera également la statistique de Poisson qui régit l'incertitude sur le nombre de désintégrations mesurées. On prendra également en compte le bruit de fond, c'est-à-dire les radiations ne provenant pas de la source. Enfin, on étudiera la notion d'angle solide et on déterminera l'activité du ^{137}Cs à partir de la mesure du flux de particules à une distance donnée de la source radioactive.

3 Contexte théorique

Un compteur Geiger-Müller est un appareil permettant de détecter les particules ionisantes, telles que les particules α, β et γ. Il est composé d'un tube rempli d'un gaz qui vient se ioniser lorsqu'une particule chargée le traverse. Le tube est disposé entre une anode et une cathode. Lorsque l'on crée une différence de potentiel entre les deux électrodes, les ions positifs se dirigent vers la cathode et les électrons vers l'anode. En se dirigeant vers l'anode, les e^- gagnent de l'énergie et ionisent à leur tour d'autres atomes du gaz, augmentant ainsi le nombre de particules chargées. Ce phénomène est appelé "avalanche de Townsend". En atteignant l'anode, les électrons créent alors un courant électrique qu'il est alors possible de mesurer. Pour que ce phénomène d'avalanche se produise, il est nécessaire de créer un champ électrique E suffisamment élevé. Ainsi, pour une tension V_0 appliquée à une anode de rayon r_f placée au centre du tube cylindrique de rayon r_m, le champ électrique est donné, en fonction

de la distance radiale r par rapport à l'anode est donné par :

$$E(r) = \frac{1}{r} \frac{V_0}{\ln\left(\frac{r_m}{r_f}\right)} \propto \frac{1}{r} \tag{3.1}$$

L'intensité du champ électrique augmente lorsque l'on se rapproche de l'anode. Il y a donc une valeur critique V_c du champ électrique $E(r)$ dépendante du gaz utilisé pour laquelle les électrons sont suffisamment accélérés pour ioniser les atomes du gaz et ainsi créer l'avalanche de Townsend. Il est donc possible de varier V_0 afin d'atteindre cette valeur critique. Il est possible d'observer différents régimes en fonction de la valeur de V_0 :

- $V_0 < V_c$: le champ électrique n'est pas assez important afin de créer l'avalanche de Townsend. Il ne sera donc pas possible de détecter les particules ionisantes.
- $V_0 \gtrsim V_c$: le champ électrique est suffisant pour créer l'avalanche de Townsend. Le compteur Geiger-Müller est alors opérationnel et il est possible de détecter les particules ionisantes.
- $V_0 \gg V_c$: le champ électrique est trop important. Le gaz peut alors se ioniser de lui même sous l'effet du champ électrique. C'est l'effet *corona*. Le compteur Geiger-Müller n'est plus opérationnel et, de surcroit, il peut alors s'endommager.

Lorsque V_0 est dans l'intervalle $[V_c, V_{max}]$, où V_{max} est la valeur maximale de V_0 avant que l'effet corona n'apparaisse, le compteur Geiger-Müller est opérationnel. Lors du passage d'une radiation, se crée alors une avalanche de Townsend qui génère un signal électrique, le détecteur émet alors une impulsion ou coup. Il y a alors, suite à cette impulsion, une courte période durant laquelle le compteur ne pourra pas détecter une nouvelle particule ionisante. Cette période de temps est appelée le temps mort τ_d. De façon générale, le temps mort des détecteur Geiger-Müller est de l'ordre de $\tau_d \in (0.1, 5)$ ms.

3.1 Statistique de Poisson

La désintégration radioactive est un processus aléatoire. Le nombre de désintégration N mesuré lors d'un temps t suit la statistique de Poisson sous l'hypothèse que la probabilité de désintégration est constante dans le temps. Entre deux mesures réalisés sur une même durée, le nombre de désintégration peut varier, l'incertitude sur le nombre de désintégration mesuré est alors :

$$\delta N = \sqrt{N} \tag{3.2}$$

L'incertitude relative est alors de

$$r = \frac{\delta N}{N} = \frac{1}{\sqrt{N}} \tag{3.3}$$

Cependant, il est rare d'avoir constamment le même temps de mesure, il est donc important de normaliser les mesures en fonction du temps de mesure. On définit le taux comme suit :

$$\eta \pm \delta\eta = \frac{N}{t - N\tau_b} \pm \frac{\sqrt{N}}{t - N\tau_b} \tag{3.4}$$

3.2 Bruit de fond et Signal

Ainsi, grâce aux mesures des couples temps-nombre de coups (t_i, N_i), il est alors possible d'utiliser l'équation 3.4 pour déterminer le taux d'accumulation des évènements dans le détecteurs. On remarque que même en l'absence de source radioactive, des coups sont tout de même détectés. Ces coups sont dus à des désintégration ayant lieu dans l'environnement antourant le détecteur (laboratoire, murs, ...), ou au fond diffus cosmique. Ce phénomène est appelé le bruit de fond. Il est primordial de prendre

en compte ce bruit de fond dans les mesures. Il est possible de le mesurer en effectuant une mesure à blanc en l'absence de source radioactive. On peut alors trouver le couple (t_b, N_b) correspondant :

$$\eta_b \pm \delta\eta_b = \frac{N_b}{t_b - N_b\tau_b} \pm \frac{\sqrt{N_b}}{t_b - N_b\tau_b} \tag{3.5}$$

Une mesure avec une faible incertitude sur ce bruit de fond permet ensuite de modéliser le taux d'évènements réel η^* provenant de la source :

$$\eta^* \pm \delta\eta^* = \eta - \eta_b \pm \sqrt{\delta\eta^2 + \delta\eta_b^2} \tag{3.6}$$

Il est important de baser les observations (graphes, discussions, ...) sur ce taux d'évènements η^* et non pas sur le taux d'évènements brut η.

3.3 Angle solide

Un angle solide Ω est une grandeur mesuré en stéradians (sr) [1] et qui permet de quantifier la portion d'un espace à 3 dimensions. La définition mathématique d'un angle solide est la suivante :

$$\Omega = \frac{1}{2}\left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{r^2}{d^2}}}\right) \tag{3.7}$$

Cependant, si $d \geq 8r_d$, alors il est possible de faire l'approximation suivante :

$$\Omega \pm \delta\Omega \approx \frac{1}{4}\frac{r_d^2}{d^2} \pm \Omega\sqrt{\left(2\frac{\delta r_d}{r_d}\right)^2 + \left(-2\frac{\delta d}{d}\right)^2} \tag{3.8}$$

En sachant que le source radioactive émet chaque seconde A particules et que chaque particule atteignant le détecteur est enregistrer avec une efficatité ϵ, le taux des évènements détectés η^* provenant de la source est alors :

$$\eta^* = A\epsilon\Omega \approx \frac{A\epsilon}{4}\frac{r_d^2}{d^2} \tag{3.9}$$

Si on considère l'approximation de Ω

Le taux mesuré est donc linéairement proportionnel à l'inverse du carré de la distance entre la source et le détecteur tant que $d \gg r_d$. Il est alors possible de tracer le graphe de η^* en fonction de $\frac{1}{d^2}$ et d'en déduire l'activité A de la source radioactive.

3.4 Activité de la source

Enfin, on peut déterminer l'activité réel de la source de ^{137}Cs. Pour se faire, on trace le graphe de η^* en fonction de $\frac{1}{d^2}$. On effectue ensuite une régression linéaire des données. La pente m de la droite est :

$$m = \frac{A\epsilon r_d^2}{4} \tag{3.10}$$

On en déduit l'activité A de la source radioactive :

$$A = \frac{\eta^*}{\epsilon\Omega} \tag{3.11}$$

1. 1 sr = 1 m² / r², où r est la distance au centre de la sphère

4 Déroulement de l'expérience

Dans le cadre de cette expérience, on utilisera un compteur Geiger-Müller installé devant un rail sur lequel la source de radiation est disposée. Cela permettra de faire varier la distance d entre le détecteur et la source. Un générateur à haute tension est branché sur le compteur afin de créer le champ électrique nécessaire au fonctionnement du détecteur. Une fois enclenché, il est possible de régler le détecteur sur 2 modes différents : durée fixe ou durée infini. Dans le second, le détecteur effectue des mesures jusqu'à un arrêt manuel de ce dernier. Le rayon de détection du détecteur est de $r_d = (15.0 \pm 0.2)\,\text{mm}$. Un petit couvercle en aluminium est placé devant le détecteur. Il contient une plaque de plomb de 2 mm améliorant la conversion des rayonnement γ en rayonnement β par effet photoélectrique. L'efficacité du détecteur pour des particules γ est alors d'environ $\epsilon = 0.009$, i.e., $\epsilon = 0.9\%$. lorsque le couvercle Pb + Al est placé. On utilisera du ^{137}Cs comme source radioactive. Elle produit des rayonnement β et γ. Les photons ainsi produits ont une énergie de $E_\gamma = 662\,\text{keV}$, soit environ $1.0606 \cdot 10^{-13}$ J.

4.1 Mise en route et réglages

On commence par poser la source à une distance $d = 120\,\text{mm}$ du détecteur. On règle ensuite le compteur de façon à mesurer les radiations pendant 32s. On fait varier la tension V_0 entre 300 V et 875 V. Cela permet de déterminer à partir de quelle tension le compteur devient opérationnel et quand la variation du taux de comptage est grande. On change ensuite le temps de comptage pour qu'il ne soit plus sur ∞, on en profite pour disposer la source de manière à avoir plus de 1000 coups à 600 V en environ 32 s. Sans bouger la source, on effectue une mesure systématique du taux de comptage en fonction de la tension V_0. On utilise alors les tensions $V_0 = \{300 + x \cdot 25 | x \in \mathbb{N}, 0 < x \leq 24\}$ et on représente les données $(V_i, N_i \pm \sqrt{N_i})$ graphiquement. On peut alors observer la zone de plateau du compteur Geiger-Müller ainsi que sa zone morte. On détermine ensuite la pente $\frac{\mathrm{d}N}{\mathrm{d}V}$ du plateau et on normalise la pente par la moyenne du plateau, i.e., $\frac{1}{N_{av}} \frac{\mathrm{d}N}{\mathrm{d}V}$. Enfin, pour finaliser cette première partie, on choisit un point de fonctionnement, soit une tension telle que le niveau de détection soit le moins sensible possible à un changement de tensions $\frac{\mathrm{d}N}{\mathrm{d}V}$. Cette valeur U_0 sera la tension de fonctionnement du détecteur pour le reste de l'expérience.

4.2 Mesure du bruit de fond

On enlève le Césium 137 et on le replace dans son étui de plomb. On règle ensuite le compteur sur un temps de comptage de 256 s et on mesure le bruit de fond N_b à trois reprises.

4.3 Efficacité du comptage

On commence par placer le Césium 137 à une distance $d = 450\,\text{mm}$ du détecteur, on y mesure le taux de comptage dans les trois configurations suivantes :

- Sans couvercle
- Avec le couvercle en aluminium
- Avec le couvercle en aluminium et la plaque de plomb

4.4 Angle solide

On place le Césium 137 sur le rail à une distance $d \in \{100, 120, 140, 160, 180, 195, 205, 220, 240, 260, 280, 300\}$mm du détecteur. Pour chaque distance, on mesure le temps nécessaire pour obtenir au moins 1000 coups. On calcule ensuite l'angle solide Ω pour déterminer le taux de comptage réel η^* en fonction de l'angle solide Ω.

5 Résultats

5.1 Réglages et plateau du compteur Geiger-Müller

On représente graphiquement le taux de comptage N en fonction de la tension V_0. On trouve alors la tension $U_0 = 687.5$ qui correspond à la tension au milieu du plateau. On peut alors également calculer N_{av} qui correspond à la moyenne des N. On peut ensuite trouver la pente du plateau $\frac{\mathrm{d}N}{\mathrm{d}V}$ et la normaliser par N_{av}. On trouve alors

$$\frac{1}{N_{av}} \frac{\mathrm{d}N}{\mathrm{d}V} = 0.0004 \text{ V}^{-1} \tag{5.1}$$

5.2 Bruit de fond

On trouve alors que le bruit de fond est de

$$\eta_b \pm \delta\eta_b = (167.330 \pm 9.073)\,\mathrm{s}^{-1} \tag{5.2}$$

5.3 Angle solide

On peut alors déterminer la variation du taux de comptage réel η^* par rapport à l'angle solide Ω. On trouve alors

$$\frac{\mathrm{d}\eta^*}{\mathrm{d}\Omega} = 7537\,\mathrm{s}^{-1} \tag{5.3}$$

5.4 Activité du ^{137}Cs

Grâce à l'équation 3.11, on peut déterminer l'activité du ^{137}Cs :

$$A = 837\,\mathrm{kBq} \tag{5.4}$$

6 Discussion

Premièrement, lors de la détermination de la tension de fonctionnement U_0 du compteur Geiger-Müller, on observe que la pente normalisée du plateau est de 0.0004 V^{-1}. Cette valeur indique une bonne stabilité du compteur dans la plage de fonctionnement choisie, ce qui est essentiel pour des mesures précises. Cependant, il serait intéressant d'explorer davantage les variations possibles en effectuant des mesures supplémentaires à des tensions légèrement en dehors du plateau pour mieux comprendre les limites opérationnelles du détecteur. Il se pourrait donc que les dernières mesures aient été effectuées sur les limites du plateau. Heureusement, cela ne semble pas avoir eu un impact trop important sur les résultats. Concernant la mesure du bruit de fond, la valeur obtenue de 167.33 ± 9.073 s^{-1} est cohérente avec les attentes pour l'environnement du laboratoire. En ce qui concerne l'angle solide, la relation linéaire observée entre le taux de comptage réel η^* et l'inverse du carré de la distance $1/d^2$ confirme la théorie sous-jacente. Enfin, l'activité calculée du ^{137}Cs de 837 kBq est significativement inférieure à la valeur attendue de 3500 kBq. Bien qu'une partie de cette différence peut être attribuée à l'âge de la source, cette dernière ayant une trentaine d'années et que la demi vie du ^{137}Cs est de 30 ans, il est néamoins certain que des erreurs expérimentales ont contribuées à cette divergence.

7 Conclusion

Cette expérience a permis une première approche du fonctionnement d'un compteur Geiger-Müller, appareil de mesure indispensable dans le domaine de la radioactivité. Nous avons pu observer le plateau caractéristique du compteur et déterminer une tension de fonctionnement optimale. L'étude du bruit de fond a mis en évidence l'importance de prendre en compte les désintégrations naturelles dans les mesures. Enfin, l'analyse de l'angle solide nous a permis de calculer l'activité de la source radioactive ^{137}Cs, illustrant ainsi les principes fondamentaux de la détection des radiations ionisantes. Cependant, au vu du résultat obtenu pour l'activité, il est clair que certaines erreurs ont été commises. Il sera donc primordial de porter une attention particulière lors des manipulations et des mesures futures afin d'améliorer la précision des résultats.

8 Annexes

- Results 115 : Geiger Counter
- Graphique 1 : Taux de comptage N en fonction de la tension U
- Graphique 2 : Taux de comptage N en fonction de la tension U (zoom sur le plateau) avec régression linéaire
- Graphique 3 : Taux de comptage réel η^* en fonction de l'angle solide Ω