



Introduction

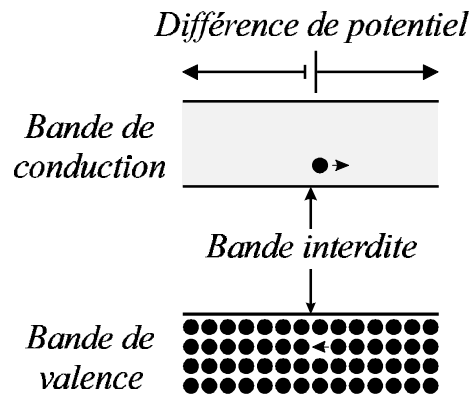
Dans cette expérience, on s'intéresse à l'efficacité relative du germanium à détecter des rayons gamma. Nous utiliserons d'abord le détecteur (de Ge) avec certains éléments radioactifs dont l'émissivité gamma vs l'énergie est bien connue. Nous pourrons ensuite, comparer les valeurs obtenues avec les valeurs connues. Nous déterminerons ainsi l'efficacité du détecteur en fonction de l'énergie (efficacité relative comme nous le verrons plus loin).

Une fois l'efficacité relative établie, nous pourrons mesurer l'intensité relative d'émission de rayons gamma pour d'autres éléments (dans notre cas l'Europium 154). Cela se fera en utilisant le détecteur en appliquant ensuite la correction d'efficacité sur les résultats.

Les prochaines sections présentent plus en détail ce que nous avons fait et ce que nous avons obtenu.

Théorie

Selon la théorie des bandes, les électrons des couches externes dans un cristal de Germanium se répartissent dans deux bandes continues d'énergie. La bande ayant l'énergie la plus basse est la bande de valence l'autre est la bande de conduction. Ces deux bandes sont séparées par une bande d'énergie interdite qui, pour le Ge, est de l'ordre de 0.75eV ($T=0K$). À basse température, la bande de valence est pleine et la bande de conduction est vide. Dans cette configuration, le germanium ne conduit pas le courant puisque des bandes pleines (ou vides) n'autorisent aucun transport d'électron. Si la température augmente et que l'agitation thermique est suffisante pour conférer à un électron 0.75eV, celui-ci va passer à la bande de conduction laissant derrière lui un trou. L'électron dans la bande de valence est libre de se déplacer puisque cette bande n'est pas pleine. Le trou peut aussi se déplacer dans la bande de valence; un électron va combler le trou laissant derrière lui un autre trou et ainsi de suite. Ce déplacement électron-trou produit un courant qui peut être mesuré.



Dans un détecteur au germanium, on abaisse la température pour réduire l'agitation thermique. Lorsqu'un rayon gamma frappe un atome du cristal, un électron est arraché et acquiert toute l'énergie du gamma par le processus photoélectrique: le photon est totalement absorbé (l'effet Compton et la production de paires ne nous intéressent pas dans cette expérience). L'électron passe à la bande de conduction et laisse un trou dans la bande de valence. L'application d'une différence de potentiel sur le germanium produira alors un courant. Ce courant sera transformé en pic de tension par un dispositif électronique. L'amplitude de ce pic est mesurée et est proportionnelle à l'énergie du gamma.

En observant un certain temps, on peut compter le nombre de pics associés à chaque énergie. L'intensité relative d'émission de rayons gamma à une énergie donnée sera donc proportionnelle au nombre S de pics comptés à cette énergie. Toutefois, la section efficace du Ge décroît avec l'augmentation de l'énergie i.e. la probabilité de détecter les gammas diminue lorsque l'énergie des gammas augmente. Ce qui nous amène à introduire l'efficacité relative e du détecteur en fonction de l'énergie. Nous mesurerons alors, à une certaine énergie (indice 1), S qui dépendra de l'intensité mais aussi de l'efficacité du détecteur. On aura: $S_1 = I_1 e_1$. Si on répète à une autre énergie (n), on aura: $S_n = I_n e_n$. Ce qui nous donne (puisque ces relations sont linéaires):

$$\frac{S_1}{S_n} = \frac{I_1 e_1}{I_n e_n}$$

Equation 1

Manipulations et montage

Cette section présente très brièvement les manipulations de l'expérience; voir le protocole pour plus de détail¹. La figure suivante présente un schéma simplifié du montage. Un système de réfrigération par conduction à l'azote liquide abaisse la température du germanium pour assurer qu'il n'y ait pas de conduction électrique thermique. Un générateur de tension sert à appliquer le potentiel sur le détecteur (qui est dans notre cas d'environ 3000V). Nous plaçons les sources à distance constante en prenant soin de bien les aligner dans l'axe du détecteur.

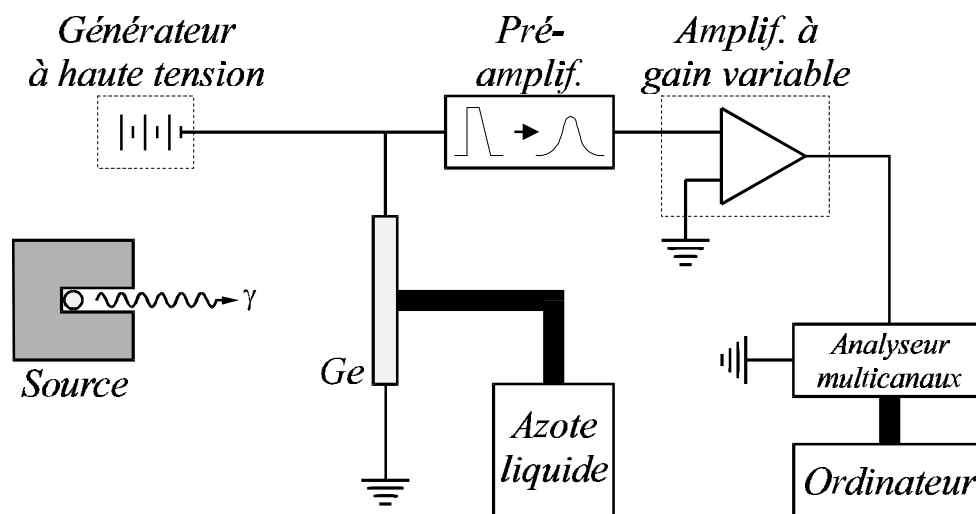


Figure 1

Lorsque des impulsions de tension sont engendrées par les gammas, elles sont transformées en pics \sim gaussien par un préamplificateur. Un autre amplificateur, à gain variable, permet d'augmenter l'amplitude de ces pics pour que l'analyseur puisse les détecter. L'analyseur voit l'amplitude de ces pics (parfois appelés photopics) et les répartit sur 2048 canaux. L'ordinateur comptabilise et mémorise le nombre de comptes associés à chaque canal (ou énergie) et en fournit une représentation graphique. Nous pouvons donc observer les spectres gamma et calculer la surface S des photopics pour chaque énergie.

Dans cette expérience, nous utilisons les sources suivantes: ^{22}Na , ^{207}Bi , ^{60}Co , ^{125}Sb , ^{133}Ba et ^{154}Eu . Le gain est réglé de telle sorte que tous les pics de $\sim 100\text{keV}$ à $\sim 1800\text{keV}$ soient mesurés. Comme les énergies d'émission du ^{125}Sb et du ^{133}Ba sont plus faibles, ces éléments nécessiteront un gain double. L' ^{154}Eu sera considéré comme l'élément dont l'émissivité relative est inconnue.

Après avoir réglé l'échelle de l'ordinateur qui nécessite une calibration énergie vs canal, nous pouvons débiter les observations pour chaque élément. Il faut attendre que S ait atteint un minimum d'environ 10 000 pour chaque pic (surface) avant d'arrêter et de passer à l'élément suivant. Cela est nécessaire pour réduire l'erreur statistique (qui est presque nulle à 10 000).

¹MONARO, S., Mesure de l'efficacité d'un détecteur de Ge, Notes de cours de PHY 2477, Université de Montréal, 1995.

Observations

Voici ce que nous avons obtenu pour chaque élément. La tension sur le détecteur était réglée à environ 3kV et les sources ont toujours été placées à 7.5cm du boîtier. Temps est la durée de la prise des mesures. L'incertitude (inférieure à 1%) a été déterminée en prenant une mesure de surface considérée comme maximale (S_{\max}) et une autre minimale (S_{\min}). En utilisant cette méthode, on a (où ΔS est l'erreur sur la surface des pics):

$$S = \frac{S_{\max} + S_{\min}}{2} \quad \Delta S = \frac{S_{\max} - S_{\min}}{2}$$

Observations									
Élément	Énergie keV	S u·keV	ΔS u·keV	Temps	Élément	Énergie keV	S u·keV	ΔS u·keV	Temps
²⁰⁷ Bi	569.62	42617	21	1'00"	²² Na	511.01	39206	20	6'50"
	1063.44	19162	10			1274.55	10035	5	
⁶⁰ Co	1173.23	10996	5	15'50"	¹²⁵ Sb	176.30	13974	7	56'50"
	1332.50	10012	5			427.90	29377	15	
¹⁵⁴ Eu	123.10	247313	124	18'53"		463.40	9508	5	
	247.92	30446	15			600.56	12721	6	
	591.71	10021	5		635.90	7578	4		
	723.27	34668	17		¹³³ Ba	383.90	10242	5	3'50"
	756.82	7358	4			356.03	74477	37	
	873.21	17481	9			302.85	25910	13	
	996.30	13562	7			276.33	10899	5	
	1004.78	23570	12		80.31	68823	34		
1274.08	37564	19							

Les signaux pour ¹²⁵Sb et ¹³³Ba sont doublement amplifiés. ΔS est très faible, de l'ordre de 0.05%.

Tableau 1

Analyse

Pour utiliser l'Equation 1, nous prendrons les valeurs du tableau suivant comme référence.

Valeurs de référence							
Élément	Énergie keV	I_{rel}	ΔI_{rel}	Élément	Énergie keV	I_{rel}	ΔI_{rel}
^{207}Bi	569.62	100	3.00	^{22}Na	511.01	178.00	5.33
	1063.44	78.60	0.00		1274.55	100	0
^{60}Co	1173.23	100.00	3.00	^{125}Sb	176.30	22.67	0.63
	1332.50	100	0		427.90	100	0.00
^{154}Eu	123.10	111.32	3.34		463.40	35.11	0.82
	247.92	19.13	0.57		600.56	60.20	1.40
	591.71	14.63	0.44	635.90	38.80	0.90	
	723.27	59.82	1.79	^{133}Ba	383.90	14.59	0.43
	756.82	13.03	0.39		356.03	100	0
	873.21	35.20	1.06		302.85	29.78	0.89
	996.30	30.20	0.91		276.33	11.49	0.35
	1004.78	52.80	1.58	80.31	54.90	1.65	
1274.08	100	0					

Tiré de la publication de G.Aubin et al.

Tableau 2

De cette équation, on tire que l'efficacité du détecteur à une énergie n est:

$$e_n = \frac{S_n I_1 e_1}{S_1 I_n}$$

Equation 2

Où S_n est la surface des photopics mesurés et I_n est l'intensité relative de référence (S_1 et I_1 sont les valeurs correspondantes à un photopic arbitraire). Nous avons débuté l'analyse avec le ^{22}Na . Nous avons posé une efficacité relative $\epsilon_1=1.00$ pour le photopic à 1274.55keV. Ce qui donne directement à l'aide de l'Equation 2 une efficacité de 2.28 pour 511.01keV. Nous avons procédé de la sorte pour les autres éléments du Tableau 1 (sauf ^{154}Eu) en posant des ϵ_1 arbitraires. Nous avons ainsi obtenu plusieurs efficacités relatives. En plaçant ϵ_n vs l'énergie sur un graphique log-log on constate que les points de l'antimoine et du baryum sont distribués linéairement (les autres ayant seulement deux points). Cela suggère que l'efficacité relative en fonction de l'énergie suit une relation de puissance (où E_n est l'énergie du photopic n):

$$e_n = 10^b E_n^m$$

Pour ramener toutes les efficacités relatives propres aux éléments dans le même référentiel que le ^{22}Na , nous avons essayé plusieurs possibilités pour les valeurs ϵ_1 des autres éléments. Pour chaque série, nous avons ajusté par moindres carrés la meilleure courbe de puissance et calculé l'écart type (à la courbe). Nous avons ensuite retenu la combinaison des ϵ_n qui présentait l'écart type le plus faible (tout cela par ordinateur).

Ce calcul a été fait sans considérer les photopics à 80.31keV et 176.30keV car ils n'étaient visiblement pas distribués de la même manière que les autres points. Cela est probablement causé par l'absorption des photons gamma à basse énergie par le boîtier (Al) du détecteur.

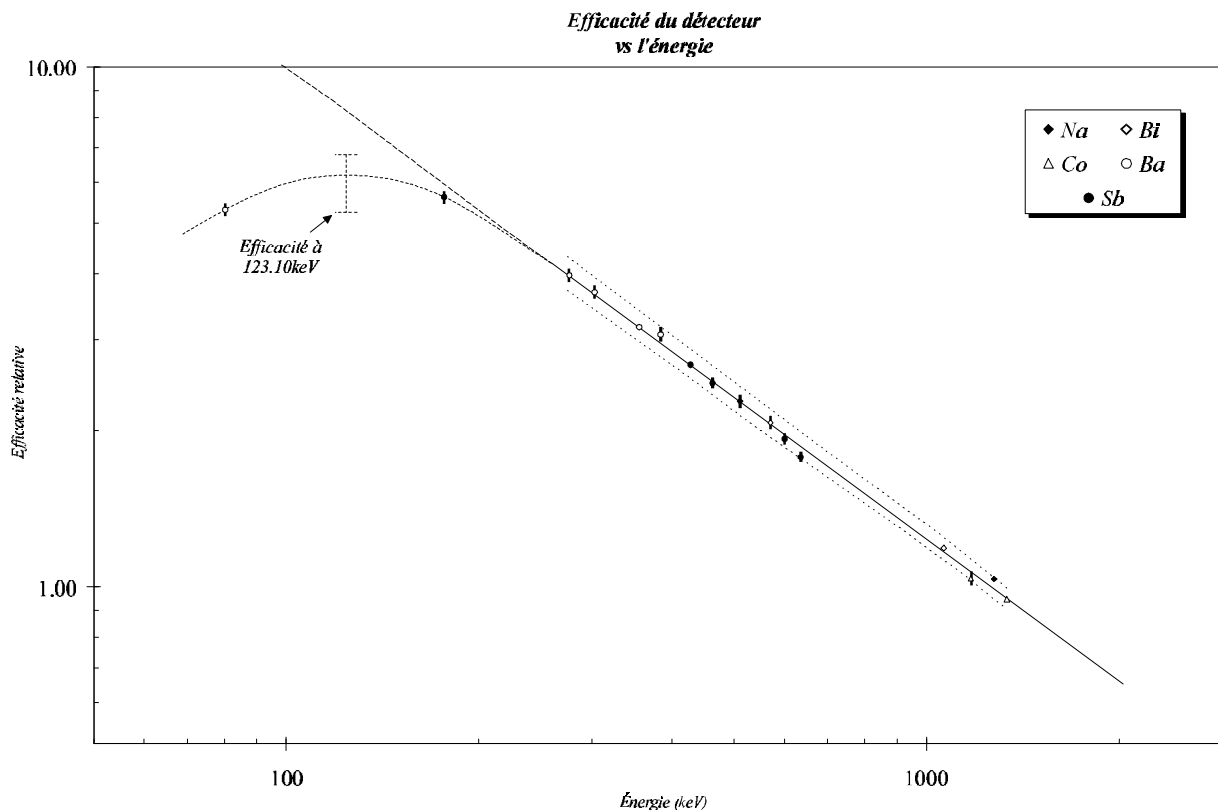
Le tableau suivant présente le résultat du calcul. L'incertitude $\Delta\varepsilon$ est calculée à partir des incertitudes des paramètres connus (S_n et I_n).

Efficacité du détecteur selon l'énergie											
Élément	Energie keV	ε	$\Delta\varepsilon$	Élément	Energie keV	ε	$\Delta\varepsilon$	Élément	Energie keV	ε	$\Delta\varepsilon$
²² Na	511.01	2.28	0.07	¹²⁵ Sb	176.30	5.62	0.16	¹³³ Ba	383.90	3.06	0.09
	1274.55	1.04	0.00		427.90	2.68	0.00		356.03	3.16	0.00
²⁰⁷ Bi	569.62	2.07	0.06		463.40	2.47	0.06		302.85	3.70	0.11
	1063.44	1.19	0.00		600.56	1.93	0.05		276.33	3.98	0.12
⁶⁰ Co	1173.23	1.04	0.03	635.90	1.78	0.04	80.31		5.32	0.16	
	1332.50	0.95	0.00								

La valeurs grisées sont les ε_i ajustés par l'ordinateur.

Tableau 3

En traçant l'efficacité vs l'énergie sur un graphique log-log, on obtient la figure suivante:



La droite sur la Figure 2 est la meilleure courbe de puissance ajustée aux points soit:

$$e(E) = 10^{2.82 \pm 0.08} E^{-0.91 \pm 0.02}$$

Où $\varepsilon(E)$ est l'efficacité relative en fonction de l'énergie. Les droites en pointillé fin de part et d'autre de la droite sont les limites inférieure et supérieure de $e(E)$ majoré de son incertitude. On remarque sur la Figure 2 que pour $E < 200\text{keV}$, la relation courbe (comme mentionné précédemment). Nous avons alors tracé qualitativement, faute de points expérimentaux, une courbe passant par les points à 80.31keV et 176.30keV . De cette courbe, très approximative, on tire que $e(123.10\text{keV})$ (qui sera utile plus loin), est 6.04 ± 0.85 . Cette valeur très conservatrice est inscrite sur le graphique.

Maintenant que nous avons $e(E)$, nous pouvons calculer les intensités relatives de l' ^{154}Eu en tirant de l'Equation 1 que:

$$I_n = \frac{S_n I_1 e_1}{S_1 e_n}$$

En référant l'indice 1 à l'énergie 1274.08keV , on obtient les intensités relatives suivantes (ce tableau compare nos valeurs avec les valeurs de références):

Efficacité relative du germanium							
Élément	Énergie keV	ε	$\Delta\varepsilon$	I_{rel} Présent ouvrage	ΔI_{rel}	I_{rel} G. Aubin et al,	ΔI_{rel}
^{154}Eu	123.10	6.04	0.83	107.99	15.18	111.32	3.34
	247.92	4.40	0.34	18.24	1.43	19.13	0.57
	591.71	1.99	0.12	13.26	0.84	14.63	0.44
	723.27	1.66	0.10	55.10	3.28	59.82	1.79
	756.82	1.59	0.09	12.19	0.72	13.03	0.39
	873.21	1.40	0.08	32.99	1.85	35.20	1.06
	996.30	1.24	0.07	28.86	1.56	30.20	0.91
	1004.78	1.23	0.07	50.54	2.72	52.80	1.58
	1274.08	0.99	0.05	100	0	100	0

L'efficacité relative grisée est obtenue avec la relation qualitative. Voir texte.

Tableau 4

À la page suivante se trouve une représentation graphique de ces résultats.

*Intensité relative des
photopics vs leur énergie*

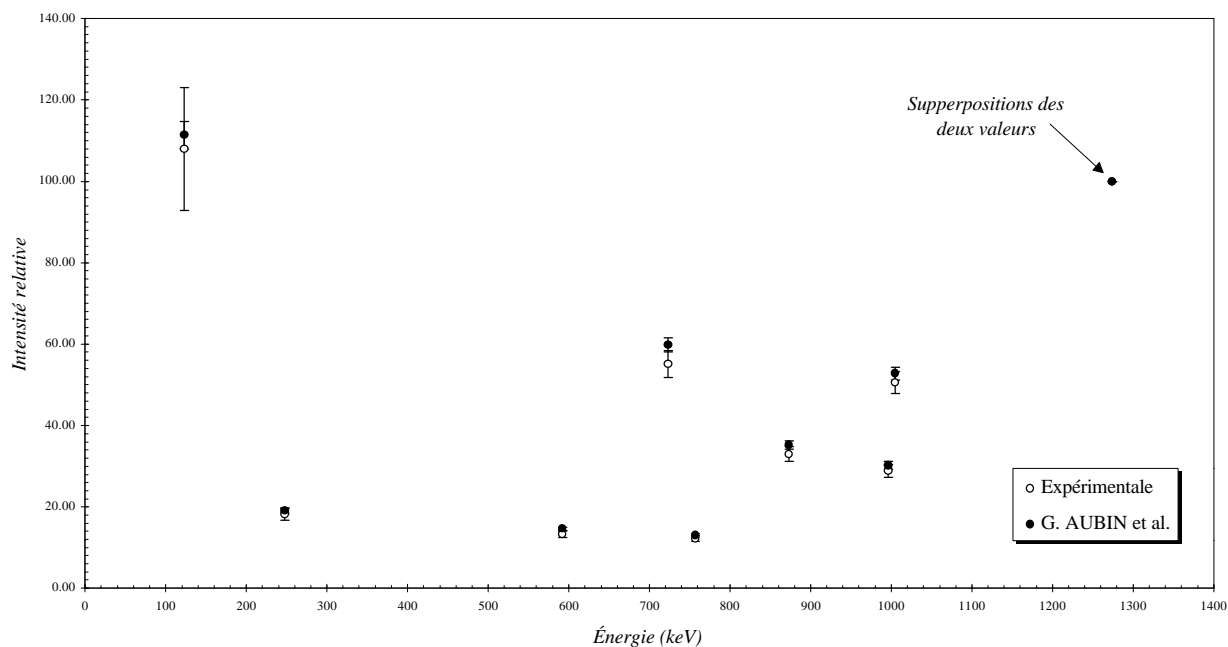


Figure 3

On remarque immédiatement en regardant cette figure que nos valeurs coïncident avec la référence. Le point à 123.10keV est lui aussi relativement conforme malgré sa grande incertitude (en fait, l'incertitude est probablement plus faible que ce que nous avons utilisé).

Conclusion

Les résultats sont consistants; pour des énergies allant de ~200keV à ~1000keV nous obtenons une efficacité relative du détecteur qui suit une relation de puissance. Cela est conforme à la figure deux du protocole expérimental (note 1, page 3) pour la courbe du germanium. La relation que nous obtenons est:

$$\epsilon(E) = 10^{2.82 \pm 0.08} E^{-0.91 \pm 0.02}$$

Puisque c'est une efficacité relative, nous retiendrons seulement que c'est une relation de puissance. Les grandeurs dépendent des valeurs arbitraires fixées lors de l'analyse (Tableau 3). Par contre, pour des énergies inférieures à ~200keV, les points divergent de cette relation. Cela est probablement dû au boîtier du détecteur qui absorbe les gammas en parti avant qu'ils soient détectés. En répétant, l'expérience sans le boîtier du détecteur (ou avec un boîtier différent) nous pourrions vérifier cette hypothèse. Autrement, en choisissant des éléments dont les photopics connus coïncident avec la région de ~70keV à ~200keV cela nous renseignerait plus sur la forme de la relation $\epsilon(E)$ à cet endroit.

La très bonne corrélation des résultats obtenus, après correction de l'efficacité relative du détecteur lors de l'analyse de l'euporium 154, montre que la relation de puissance est bonne. Même le pic de l' ^{154}Eu situé dans la zone où la relation courbe (Figure 2) est conforme aux valeurs de références.