

Étude des capacités d'imagerie permises par l'algorithme de tracking d'AGATA

ENCADRANTS: STEZOWSKI OLIVIER
DUDOUE JÉRÉMIE

Antoine Corbel

2 juillet 2020

1 Introduction

Pour clôturer la première année du master de physique de Lyon 1, j'ai effectué un stage de 6 semaines au sein de l'Institut de Physique des 2 Infinis (IP2I), plus précisément dans le groupe Matière Nucléaire.

L'Institut de Physique des 2 Infinis est impliqué dans de nombreux domaines liés à la physique subatomique. Parmi les thématiques abordées, il est possible de citer la physique des particules, des astroparticules, la physique théorique ou encore la physique nucléaire, groupe auquel j'ai été affecté, comme cité plus haut.

Mon rôle durant ces 6 semaines a été de m'intéresser au tracking des rayonnements gamma dans le détecteur AGATA, et d'explorer les capacités d'imagerie de ce dernier.

Le stage, qui devait s'effectuer dans les locaux de l'IP2I, a été modifié pour cause de crise sanitaire. C'est pourquoi le sujet du stage a été recentré sur la partie théorique du tracking gamma, notamment via l'analyse de données de tracking, obtenues par simulation, dans l'environnement ROOT. L'objectif était de réussir à reconstruire la position d'émission de la source puis de déterminer la résolution sur cette position, en faisant varier différents paramètres.

Cela a été l'opportunité pour moi de développer des compétences en C++, langage utilisé sous ROOT, mais également de mobiliser mes connaissances en physique nucléaire pour les appliquer à des études concrètes.

Dans un premier temps ce rapport présentera la physique étudiée dans ce stage, en introduisant l'effet Compton. Ensuite, il fera l'état de l'art dans le domaine du tracking gamma, en parlant plus précisément du détecteur AGATA, et des algorithmes de tracking utilisés de nos jours. Par ailleurs, l'environnement ROOT sera introduit en expliquant comment il est possible d'analyser les fichiers tracking grâce à ce dernier. Le cœur du sujet sera ensuite abordé avec la présentation et l'interprétation des résultats obtenus. Enfin, les tenants et aboutissants du stage seront évoqués dans la conclusion.

2 L'effet Compton

Le détecteur AGATA permet de tracker les trajectoires des photons dans la matière. Ces derniers ne se déplacent pas sans interagir, ils rencontrent des noyaux, et notamment des électrons. Plusieurs phénomènes physiques peuvent alors avoir lieu, comme l'effet photoélectrique, la création de paire ou encore l'effet Compton. Dans ce stage, l'étude a porté sur le tracking des photons interagissant par diffusion Compton, c'est pourquoi le processus se doit d'être un peu plus détaillé :

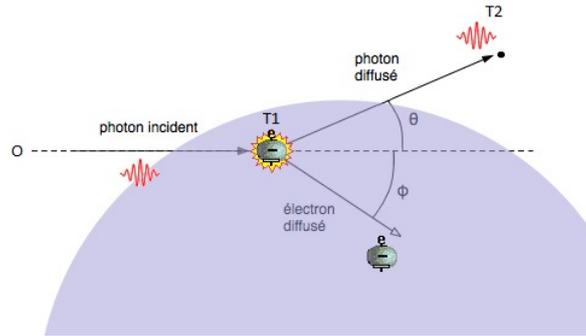


FIGURE 1 – Schéma de principe d'une diffusion Compton [5]

Le schéma de la figure 1 illustre le choc entre le photon incident et l'électron, se finalisant par un partage de l'énergie entre le photon diffusé et l'électron diffusé. La diffusion Compton étant élastique, il y a conservation de l'énergie cinétique du photon incident.

On peut également voir sur le schéma les notations O, T1 et T2, qui correspondent respectivement au point de départ du gamma dans le détecteur, à la position de sa première et sa deuxième interaction. Ces notations seront réutilisées par la suite.

A partir de l'énergie E_0 du photon incident, il est alors possible de calculer E , celle du photon diffusé, à l'aide de la formule suivante, valide si l'électron rencontré est au repos :

$$E = \frac{E_0}{1 + \alpha(1 - \cos \theta)} \quad (1)$$

avec $\alpha = \frac{E_0}{m_e c^2}$ et θ l'angle entre OT1 et T1T2, angle de diffusion du photon.

Ce qu'il se passe dans le détecteur, c'est une succession d'interactions du photon avec des électrons, basées sur les trois processus cités plus haut. L'objectif d'AGATA est de reconstruire les points d'interaction du gamma afin de récupérer l'énergie totale du gamma et la position de ses premiers points d'interaction. A partir de ces informations, il est possible de reconstruire la position de la source. La partie suivante détaille un peu plus ces différents points.

3 AGATA et les algorithmes de tracking

Acronyme d'*Advanced GAMMA Tracking Array*, AGATA est un ensemble de détecteurs en germanium hyper-pur permettant de mesurer l'énergie et la position des points d'interaction des rayons gamma avec précision. Sa forme finale sera une sphère composée de 180 détecteurs. Cela signifie qu'il pourra reconstruire les énergies et trajectoires des rayons gamma dans toutes les directions.

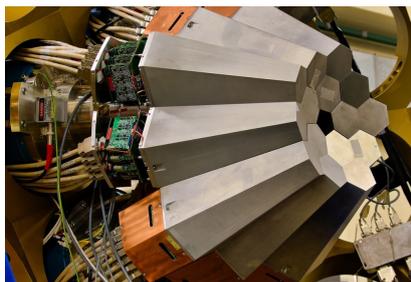


FIGURE 2 – Photo d’une portion de la sphère formée par les détecteurs d’AGATA [3]

Au centre de la sphère se situe une cible sur laquelle vient frapper un faisceau d’ions lourds. Les noyaux touchés par ce dernier sont alors excités et pour se désexciter, ils émettent des photons, soit le rayonnement gamma qui par la suite viendra interagir dans les cristaux de germanium. Chaque interaction va alors engendrer un ensemble de signaux électriques dans le détecteur [1].

Reconstruire la position de la source peut avoir un intérêt lors d’une expérience où l’on cherche à viser une cible au centre du détecteur avec un faisceau d’ions par exemple. Lors de l’expérience, il est impossible de vérifier visuellement que le faisceau est bien dirigé sur la source ou s’il est à côté, le tracking peut alors servir à déterminer cela.

4 L’environnement ROOT

ROOT est une bibliothèque C++ développée par le CERN [2] et utilisée pour l’analyse de données provenant d’expériences venant notamment de la physique des particules ou encore de l’astrophysique. Il est possible d’ouvrir des fichiers .root, et d’explorer les données qui y sont contenues pour les exploiter. C’est ce qui a été fait lors du stage pour étudier des fichiers résultants de l’application de l’algorithme de tracking à des données simulées issues de GEANT4, autre environnement développé par le CERN permettant de simuler le passage de particules à travers la matière.

5 Présentation des résultats

Si on reprend la formule Compton (1), on voit que l’énergie du gamma diffusé dépend de l’angle theta de diffusion par rapport au gamma incident.

Pour tester la précision de l’algorithme de tracking, il faut voir s’il est éloigné de la réalité. Les données provenant des fichiers tracking sont de type GEANT4 comme précisé dans la section précédente, de ce fait on connaît la position exacte de la source pour chaque fichier, ainsi que l’énergie des gamma qui passent dans le détecteur. Pour le premier fichier tracking, la source se situe en (0,0,0) et l’énergie des gamma est de 500 keV, avec l’ajout d’une incertitude statistique sur cette dernière valeur.

Parmi les variables disponibles dans les fichiers root, il y a la position en (x,y,z) des points d’interaction des gamma. Sachant que la source est en (0,0,0), il est possible de calculer le $\cos\theta$ entre OT1 et T1T2 comme montré figure 1. On a en effet, en partant du produit scalaire, la formule suivante :

$$\cos \theta = \frac{\langle \overrightarrow{OT1} | \overrightarrow{T1T2} \rangle}{\|\overrightarrow{OT1}\| \|\overrightarrow{T1T2}\|} \quad (2)$$

Il faut ensuite comparer cette valeur de cosinus avec celle obtenue via la formule Compton (1) dans laquelle on isole $\cos \theta$:

$$\cos \theta = 1 - m_e c^2 \left(\frac{1}{E} - \frac{1}{E_0} \right) \quad (3)$$

Pour un fichier tracking, il y a un million d'évènements, parmi lesquels on compte presque 500 000 interactions de type diffusion Compton. Il faut donc comparer les valeurs des cosinus "géométrique" et "théorique" pour chacune d'entre elles. On peut tracer un histogramme de la différence comme sur la figure (3) :

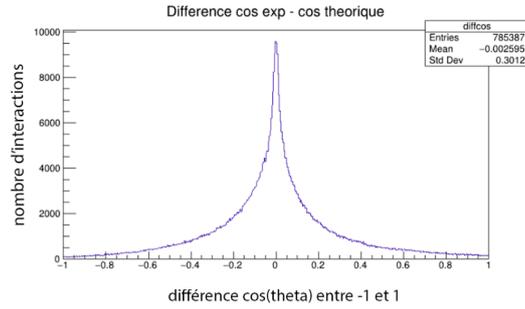


FIGURE 3 – Différence entre le cosinus géométrique (angle entre OT1 et T1T2) et théorique (calculé à partir de la formule Compton)

Cet histogramme montre en ordonnée le nombre d'interactions, et on remarque que la différence se rapproche de 0 pour un grand nombre de valeurs, avec cependant des différences plus larges qu'il faudrait expliquer.

Avec nos données, il est possible de tracer la différence de cosinus (diffcos) en fonction de la distance entre la première et la deuxième interaction (T1T2) :

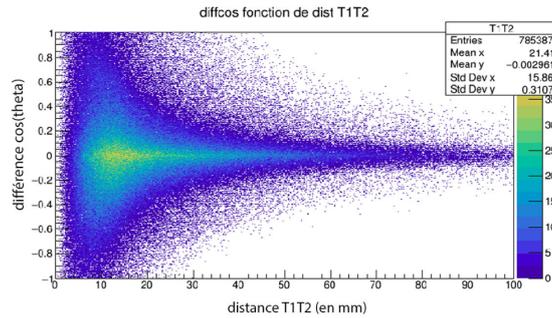


FIGURE 4 – Différence entre le cosinus géométrique et théorique en fonction de la distance T1T2 (en mm)

Ce que l'on remarque c'est que plus T1T2 augmente, plus la différence entre les $\cos \theta$ diminue, tout comme le nombre d'évènements, qui diminue grandement si l'on regarde l'échelle des couleurs à droite du graphique. Cela vient du fait que plus cette distance augmente, plus l'erreur sur la position des deux interactions devient négligeable dans le calcul du cosinus.

L'étape suivante est de rechercher la position de la source sur l'axe Z. Dans le cas général, il faudrait faire une recherche de la position de la source en 3 dimensions. Dans le cadre de ce stage, nous nous sommes focalisés sur une approche de premier ordre uniquement basée sur un axe.

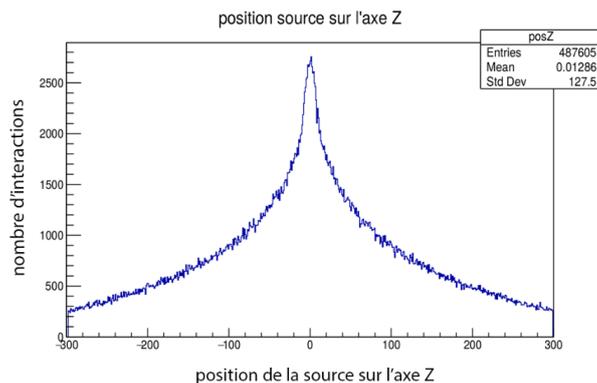


FIGURE 5 – Position de la source sur l'axe Z obtenue avec l'algorithme

Pour trouver la position de la source, une méthode pratique est de chercher pour chaque évènement la position sur l'axe Z qui minimise la différence entre les $\cos \theta$. En pratique, il a fallu balayer l'axe Z de -300 à +300 en cherchant à chaque fois la valeur la plus petite de la différence des cosinus. Une fois cette position obtenue, il est possible d'afficher l'histogramme de la position sur l'axe Z pour tous les évènements du fichier tracking, voir Figure (5).

On retrouve une position centrée en $Z=0$, ce qui est bon signe étant donné que l'on sait que la source se situe en $(0,0,0)$ sans incertitude. Pour évaluer la précision de l'algorithme, on estime la résolution sur la position de la source reconstruite en fonction de sa position réelle.

La grandeur à évaluer pour juger la résolution est la largeur à mi-hauteur (fwhm) de la courbe. Plus cette dernière est faible, meilleure est la résolution sur la position de la source. La méthode utilisée pour calculer la fwhm a été de prendre pour chaque pic le point le plus élevé, et de diviser la hauteur par 2 pour calculer la largeur du pic à cet endroit.

Cette manipulation a été faite également en ajoutant de nouvelles contraintes, en énergie notamment, en autorisant seulement les gamma pleinement absorbés (énergie reconstruite entre 495 et 505 keV), et aussi sur T1T2, à cause de sa forte influence (voir figure 4). Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau ci-dessous :

Source centrée//15cm	FWHM (mm)	Position pic (mm)	Proportion d'évènements (%)
Aucune restriction	$87 \pm 1 // 167 \pm 1$	$-0.5 \pm 1 // 149.5 \pm 1$	100//100
Restriction en énergie	$72 \pm 1 // 134 \pm 1$	$-0.5 \pm 1 // 149.5 \pm 1$	83.6//80.8
Energie + T1T2 \geq 25	$32 \pm 1 // 66 \pm 1$	$-0.5 \pm 1 // 149.5 \pm 1$	32.0//27.3
Energie + T1T2 \geq 50	$20 \pm 1 // 33 \pm 1$	$-0.5 \pm 1 // 151.5 \pm 1$	12.8//8.64
Energie + T1T2 \geq 75	$18 \pm 1 // 20 \pm 1$	$-0.5 \pm 1 // 151.5 \pm 1$	7.92//4.62
Energie + T1T2 \geq 100	$16 \pm 1 // 19 \pm 1$	$-0.5 \pm 1 // 151.5 \pm 1$	6.65//3.76

Il apparait donc clairement que plus la source est décentrée, moins la résolution sur sa position sera précise. Il faut donc, en fonction de la statistique de chaque expérience, choisir si l'on peut se permettre une grande précision ou s'il faut conserver la statistique au détriment de la résolution. Le dernier paramètre qui a été étudié est l'énergie des gamma. Voici le tableau résumant les résultats pour des gamma de 2 MeV, avec la source centrée en $Z=0$ et décalée de 15 cm :

Source centrée//15cm	FWHM (mm)	Position pic (mm)	Proportion d'évènements (%)
Aucune restriction	$129 \pm 1 // 196 \pm 1$	$0.5 \pm 1 // 145.5 \pm 1$	100//100
Restriction en énergie	$83 \pm 1 // 131 \pm 1$	$0.5 \pm 1 // 145.5 \pm 1$	61.1//57.2
Energie + T1T2 \geq 25	$51 \pm 1 // 89 \pm 1$	$0.5 \pm 1 // 150.5 \pm 1$	27.2//22.7
Energie + T1T2 \geq 50	$23 \pm 1 // 53 \pm 1$	$0.5 \pm 1 // 145.5 \pm 1$	9.75//6.24
Energie + T1T2 \geq 75	$16 \pm 1 // 41 \pm 1$	$1.5 \pm 1 // 145.5 \pm 1$	4.53//2.09
Energie + T1T2 \geq 100	$15 \pm 1 // 32 \pm 1$	$1.5 \pm 1 // 150.5 \pm 1$	3.13//1.19

Ces valeurs montrent que l'on a une moins bonne résolution sur les gamma de 2 MeV que sur ceux de 500 keV, que ça soit pour une source centrée ou non. Pour le cas de la source décentrée, la perte en statistique est telle que le calcul de la position du pic devient imprécis avec la méthode utilisée.

6 Conclusion

Ce stage a été l'occasion de découvrir un nouvel environnement de travail : ROOT. Il a nécessité des compétences en C++ et m'a permis de découvrir le fonctionnement d'un algorithme de tracking. Comme il a été montré à la fin, plus la distance entre les deux premiers points d'interaction augmente, plus la largeur à mi-hauteur diminue, mais également le nombre d'interactions. Il faut donc faire un choix judicieux, un juste milieu entre la précision et le nombre d'évènements à traiter. Une méthode plus efficace pour calculer la largeur à mi-hauteur aurait été de choisir une fonction d'ajustement adaptée qui, une fois les paramètres optimisés à l'histogramme, aurait donné une résolution plus précise.

Références

- [1] A. KORICHI et T. LAURITSEN. *Tracking gamma rays in highly segmented HPGe detectors : A review of AGATA and GRETINA*. article. Eur. Phys. J. A, 2019. DOI : 10.1140/epja/i2019-12787-1.
- [2] *About ROOT*. URL : <https://root.cern.ch/about-root>. (accessed : 20/06/2020).
- [3] *AGATA*. URL : https://www.agata.org/sites/default/files/ad_photo_1024x896_0.jpg. (accessed : 28/06/2020).
- [4] J. DUDOUE. *Contenu des arbres ROOT après Tracking*. URL : <https://drive.google.com/file/d/18YiGxX3ydIFuLU4MXqesAa1WQGdDGxr3/view?usp=sharing>. (accessed : 15/05/2020).
- [5] *Effet Compton*. URL : https://www.laradioactivite.com/site/pages/Effet_Compton.htm. (accessed : 25/05/2020).