

Lucas Leveque - Stage M1 Physique Subatomique

Encadrant : L.Ducroux et O.Stézowski

Ombres dans le détecteur à rayonnement γ AGATA

1 Introduction

Ce stage s'inscrit dans la première année de master mention Physique Subatomique, il s'est déroulé du 04/05/20 au 19/06/20 au sein du groupe Matière Nucléaire du laboratoire IP2I. Le stage portait sur l'analyse de données simulées issues du multidétecteur de rayonnements gamma (γ) AGATA[1]. Ce détecteur permet de collecter, avec une grande précision (environ 5mm), les points d'interactions laissés par les rayonnements γ afin, en appliquant un algorithme, de reconstruire leur trajectoire. Cette excellente granularité permet une cartographie fine qui peut être sensible à d'éventuels objets qui se trouveraient entre la source et les détecteurs projetant, en raison de l'absorption/diffusion, une ombre.

L'objectif principal était d'étudier dans quelles conditions cette "ombre" était visible et comment ses caractéristiques pouvaient être exploitées (par exemple en remontant aux dimensions de l'objet en question ou à la position d'émission du γ). Pour ce faire nous devons effectuer des modélisations physiques de ces événements sous GEANT4[2] et ensuite étudier les résultats obtenus avec le logiciel d'analyse ROOT[3]. Au vu des circonstances exceptionnelles

dues au Covid-19, je n'ai pas pu être physiquement présent au laboratoire, la partie modélisation a donc été remplacée par une étude bibliographique du sujet.

2 Contexte du stage

AGATA (Advanced GAMMA Tracking Array) est un ensemble de 180 détecteurs en germanium, de forme sphérique qui est utilisé pour mesurer l'énergie et l'angle d'émission rayonnement γ .

Le fonctionnement est le suivant : un faisceau d'ions est envoyé sur une cible située au centre de la sphère créant ainsi des noyaux excités qui se désexcitent par rayonnement γ . Le rayonnement γ va interagir avec les détecteurs en germanium et engendrer un ensemble de signaux électriques dont on extrait, via un algorithme (PSA: Pulse Shape Analysis)[4], des points d'interactions (énergie, position).

Les algorithmes de tracking vont, pour finir, traiter ces points d'interaction et reconstruire des trajectoires à l'intérieur d'AGATA.

Dans le cadre du stage, nous avons travaillé avec des données simulées ce qui permet un accès direct (et sans erreurs) aux points d'interaction sans nécessairement appliqué le tracking.

3 Analyse des simulations

3.1 Détermination de l'ombre

Mon but était d'étudier l'ombre laissée par un tore en plomb de rayon 5cm et d'épaisseur 1cm placé au centre du détecteur perpendiculairement à Z. Pour l'étude, j'ai utilisé des fichiers de simulations numériques réalisées sous GEANT4. La figure 1 montre des simulations d'interactions entre des rayons γ et le détecteur. On peut également voir le tore :

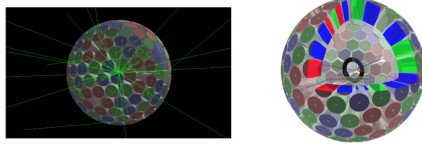


Figure 1: images issues de simulations réalisées sur AGATA

Les fichiers que j'avais à ma disposition contenaient 1 million d'événements avec une source n'émettant qu'un seul rayonnement d'énergie (0.5 MeV, 1MeV ou 2MeV) décalée d'une distance Zs sur l'axe Z

(0, 5, 10 et 15cm). Ils contenaient des informations relatives aux dépôts d'énergie simulés par GEANT4.

Pour chaque événement, j'avais accès à la liste (taille variable) des interactions sous formes de tableaux de leurs positions (en X,Y et Z) et de l'énergie déposée. Afin d'obtenir des graphiques utilisables, il fallait coder des algorithmes de traitement (C++) dans l'environnement ROOT (exemple de code figure 6 annexe). Une première opération a consisté, compte tenu des symétries du détecteur, à transformer les positions en coordonnées sphériques :

$$\theta = \arccos\left(\frac{Z}{\sqrt{Z^2 + Y^2 + X^2}}\right)$$

$$\phi = \arctan(Y/X)$$

Sur la figure 2 sont représentées des distributions de points d'impacts : on distingue une structure en nid d'abeille due aux différents cristaux d'AGATA.

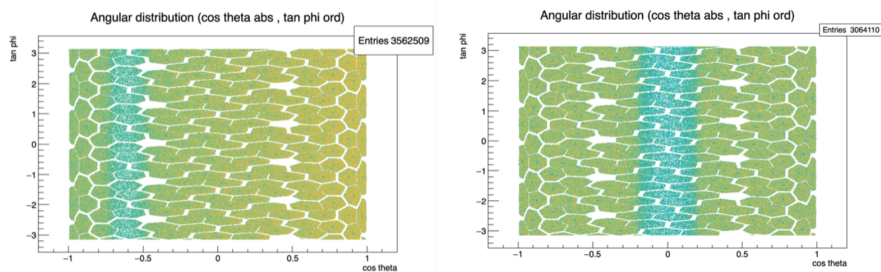


Figure 2: distribution des points d'impacts sur le détecteur pour une source de 0.5MeV située en (0,0,0) à droite et en (0,0,5) à gauche

On y visualise l'ombre créée, pour la figure de droite elle s'étend de $\cos(\theta) = -0.15$ à $\cos(\theta) = 0.15$, elle est bien centrée en 0. Pour la figure de gauche elle s'étend de $\cos(\theta) = -0.45$ à $\cos(\theta) = -0.7$, elle est centrée en -0.59 , ce qui représente un angle de 126 degrés.

La position d'émission du rayonnement γ doit pouvoir être retrouvée avec les données issues des fichiers étudiés. Lors de ce stage j'ai travaillé sur deux méthodes, la première consistait à calculer la distance sur l'axe Z à par-

tir de l'angle de l'ombre (cf figure 2) et des données géométriques. Cette méthode ne prend pas en compte le fait qu'une interaction puisse se faire en profondeur dans le détecteur, ici on la suppose à sa surface. La deuxième consistait à estimer cette position, événement par événement et de tracer sa distribution.

3.1.1 Méthode 1

Dans cette partie j'ai utilisé des données représentées dans la figure 3 pour retrouver la position :

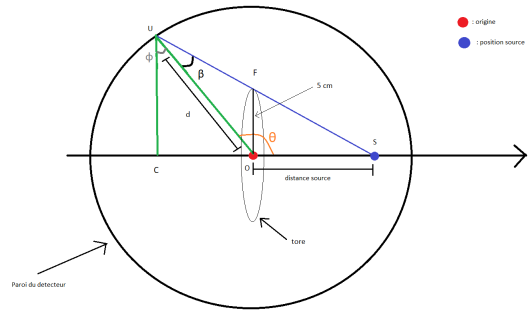


Figure 3: schéma montrant AGATA, le tore et la source

Ici OF est le rayon du tore (5cm), OU est le rayon d'AGATA (23.5cm), θ est l'angle de l'ombre et OS est la distance sur l'axe Z que l'on recherche. Après un calcul sur les angles, j'ai trouvé que (démonstration 2 annexe) :

$$OS = \frac{UC}{\tan(\phi + \beta)} - CO$$

$$\text{avec } OS = Zs$$

Grâce à cette méthode, il est possible de remonter à la position de la

source, mais uniquement lorsque la position sur l'axe Z n'est pas trop grande. En effet j'avais à ma disposition des simulations de sources situées à 0, 5, 10 et 15cm, et au-delà de 10 cm il est difficile de distinguer l'ombre car l'on retrouve peu de statistique à l'endroit où l'ombre est attendue. De plus, plus on augmente l'énergie du rayonnement, plus celui-ci est diffusé par le tore au lieu d'être absorbé. Il fallait donc une autre manière de remonter à la distance Zs (exemple de différentes positions de sources figure 7 annexe).

3.1.2 Méthode 2

Si le point U de la figure 3 est le point d'interaction dans le détecteur, à partir du théorème de Thales j'ai pu montrer que (démonstration 1 annexe) :

$$Z_s = \frac{OF * |Z|}{\sqrt{X^2 + Y^2}} * \frac{1}{1 - \frac{OF}{\sqrt{X^2 + Y^2}}}$$

La figure 4 montre les courbes que l'ont obtient lorsqu'on trace $\cos(\theta)$ en fonction de la position reconstruite Z_s .

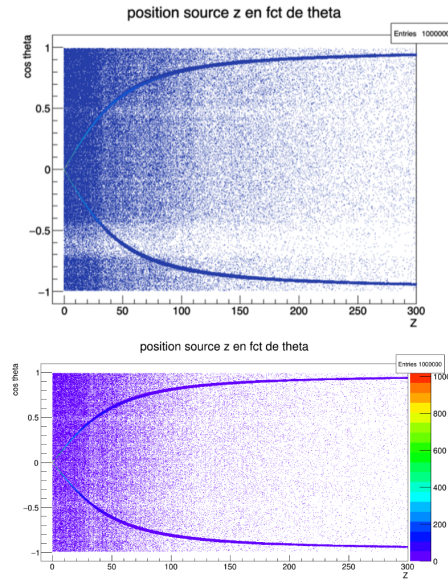


Figure 4: Corrélation entre la position de la source reconstruite et l'angle de detection pour une source de 0.5MeV positionnée en (0,0,5), avec (haut) et sans (bas) tore.

L'expression analytique de l'évolution de $\cos(\theta)$ en fonction de Z_s n'a pas été établie lors de ce stage. On remarque qu'elle part de zéro et tend asymptotiquement vers 1, les deux branches correspondent à l'avant et l'arrière du détecteur. Il est plus difficile d'y voir l'effet de l'ombre. Sur la figure 4, un fond diffus a été artificiellement ajouté et permet de visualiser la position attendue de l'ombre. Une analyse fine, en se déplaçant le long de la courbe du bas nous a permis de trouver un minimum local qui se situe aux alentours de la position attendue de la source.

La figure 5 synthétise les résultats obtenus avec les deux méthodes :

énergie (en MeV)	position théorique (en mm)	méthode 1 (en mm)	méthode 2 (en mm)
0,5	50	43,2-52,5	46,11-49,21
0,5	100	119,8-126,7	101,29-104,39
0,5	150	167,1-188,2	154,61-157,40
1	50	38,2-49,7	61,92-65,02
1	100	123,9-133,2	103,77-106,83
1	150	160,7-173,6	152,13-155,23
2	50	33,5-84,2	53,24-56,34
2	100	98,1-147,3	106,56-109,66
2	150	154,0-204,1	157,09-160,19

Figure 5: résultats obtenus pour différents cas d'énergie et de position de la source sur l'axe Z

On voit que la deuxième méthode est plus précise dans presque toutes les configurations de sources. On pouvait s'y attendre car la première méthode ne prend pas en compte toutes les interactions. Il reste cependant des effets de distortion qu'il faudra corriger.

4 Conclusion et remerciements

Les premières études réalisées ici sur données simulées ouvrent le champ pour une exploitation des capacités d'imaging d'AGATA. Nous avons en effet vu comment l'analyse d'une ombre projetée permettait de remonter à la position d'une source de rayonnement γ . Pour la suite il serait souhaitable d'améliorer la méthode pour obtenir une meilleure précision mais aussi d'étudier l'impact de l'algorithme de tracking sur les performances afin d'appliquer la méthode à des données réelles.

Je voudrais remercier M.Olivier Stézowski, M.Laurent Ducroux et M.Jérémie Dudouet de m'avoir fait confiance et de m'avoir suivi durant ce stage en cette période d'épidémie. Je voudrais également remercier Mme.Sonia Fleck ainsi que l'administration de Lyon 1 qui ont été à notre disposition durant cette période et qui ont permis le bon déroulement de ce stage.

5 Références

- [1] La Recherche, 467 (2012) p 62-67
- [2] <https://geant4.web.cern.ch/>
- [3] <https://root.cern.ch/>
- [4] A. Korichi and T. Lauritsen, Eur. Phys. J. A (2019) 55: 121

6 Annexe

```

tore:SetEntryEntry();
double sum = 0; //somme de toute les energies arrivant dans le detecteur
for (size_t i = 0; i < Ev.nb; i++) //boucle jusqu'à Ev.nb qui est le nombre d'événement
{
    sum = sum + Ev.E[i]; // à chaque pas on ajoute l'énergie correspondante au pas i à la variable sum
}
if (sum == 0.3) // si sum vaut 0.3 Mev alors on trace un point sur le graphique
{
    h_Energy->fill(Ev_x[1]); // remplissage de l'histogramme X
    h_Energy->fill(Ev_y[1]); // remplissage de l'histogramme Y
    h_Energy->fill(Ev_z[1]); // remplissage de l'histogramme Z
    h_Energy->fill(sum);
}
return kTRUE;

```

Figure 6: exemple de code utilisé pour sélectionner une gamme d'énergie à étudier

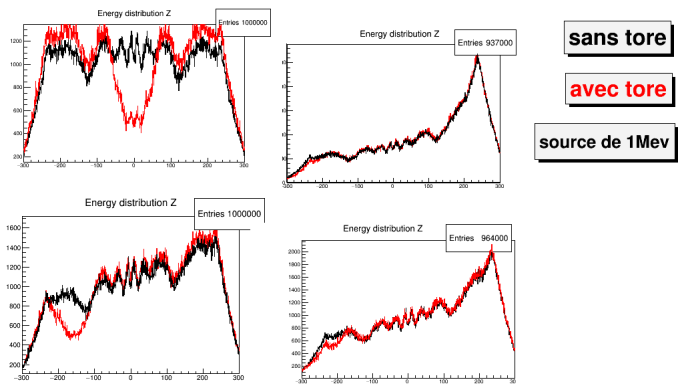


Figure 7: Distribution des points d'impact sur le détecteur dans la direction de Z pour une source de 1MeV

En haut à gauche pour une source positionnée en (0,0,0)
 En haut à droite pour une source positionnée en (0,0,15)
 En bas à gauche pour une source positionnée en (0,0,5)
 En bas à droite pour une source positionnée en (0,0,10)

Démonstration 1: Thales dans le triangle SUC (cf figure 3)

$$\frac{SF}{SU} = \frac{SO}{SC} = \frac{OF}{CU}$$

avec : $OF = 5\text{cm}$ (rayon du tore) , $CU = \sqrt{X^2 + Y^2}$, $SO = Z_s$ et $SC = SO + OC = Z_s + |Z|$

Donc :

$$Z_s = \frac{(Z_s + |Z|) * OF}{\sqrt{X^2 + Y^2}} \Rightarrow Z_s * \left(1 - \frac{OF}{\sqrt{X^2 + Y^2}}\right) = \frac{|Z| * OF}{\sqrt{X^2 + Y^2}}$$

$$\Rightarrow Z_s = \frac{OF * |Z|}{\sqrt{X^2 + Y^2}} * \frac{1}{1 - \frac{OF}{\sqrt{X^2 + Y^2}}}$$

Démonstration 2:

Théoreme du cosinus dans le triangle OFU :

$$FU^2 = d^2 + OF^2 - 2 * d * OF * \cos\left(\theta - \frac{\pi}{2}\right)$$

$$\Rightarrow FU = \sqrt{d^2 + OF^2 - 2 * d * OF * \cos\left(\theta - \frac{\pi}{2}\right)}$$

Loi des sinus dans le triangle OFU :

$$\frac{FU}{\sin\left(\theta - \frac{\pi}{2}\right)} = \frac{OF}{\sin(\beta)} \Rightarrow \beta = \arcsin\left(\frac{OF * \sin\left(\theta - \frac{\pi}{2}\right)}{FU}\right)$$

Dans le triangle rectangle OCU :

$$CO = d * \cos(\pi - \theta) \quad ; \quad UC = d * \cos\left(\theta - \frac{\pi}{2}\right)$$

Dans le triangle SCU :

$$\tan(\phi + \beta) = \frac{UC}{CS} \Rightarrow CS = \frac{UC}{\tan(\phi + \beta)}$$

$$\text{or } CS = CO + OS$$

$$CO + OS = \frac{UC}{\tan(\phi + \beta)} \Rightarrow OS = \frac{UC}{\tan(\phi + \beta)} - CO$$