

Projet GLAST

Contribution à l'étalonnage en énergie du LAT

Johan BREGEON

Centre d'Etudes Nucléaires de Bordeaux-Gradignan



Résumé

GLAST est un télescope spatial de nouvelle génération destiné à l'observation des photons γ . Son calorimètre électromagnétique, composé de barreaux de CsI(Tl), nécessitera un étalonnage en énergie en vol grâce aux ions lourds cosmiques relativistes. La campagne de faisceau-test menée au GANIL en avril 2003 a permis de caractériser la réponse des barreaux de CsI de GLAST aux ions lourds de basse énergie grâce à la mesure des effets de quenching.

1.1 Introduction

L'astronomie γ des hautes énergies s'intéresse aux photons dont l'énergie est supérieure à quelques MeV. GLAST, le *Gamma Ray Large Area Space Telescope*, est un télescope spatial qui sera lancé en 2007 en orbite basse, pour observer le ciel dans ce domaine d'énergie qui reste aujourd'hui encore très mal connu. L'étalonnage en énergie de GLAST est critique et nécessite une parfaite connaissance de la réponse des détecteurs, qui peut uniquement être déterminée par des tests sous faisceaux de particules.

1.2 GLAST - LAT

GLAST est un télescope dans la mesure où il est dédié à l'observation des objets célestes, cependant la particularité de son domaine d'énergie fait qu'il est conçu comme un détecteur de physique des particules.

1.2.1 Présentation et caractéristiques

Instruments

GLAST se compose de deux instruments, le LAT *Large Array Telescope*, et le GBM *Gamma Ray Burst Monitor* qui comme son nom l'indique est dédié à l'étude des sursauts γ . Le LAT est le coeur de GLAST, il observera le ciel des photons γ de 20MeV à 300GeV, avec une résolution angulaire inférieure à 0.15° au-dessus de 10GeV, pour un champ de vue de 2 stéradians. De par ses excellentes caractéristiques, GLAST devrait être 25 fois plus sensible que son prédécesseur,

EGRET¹ sur CGRO², complétant ainsi le domaine couvert par la nouvelle génération de télescopes au sol.

Sources

GLAST s'intéressera à tous les objets célestes émetteurs de photons γ haute énergie parmi lesquels on compte les blazars, les pulsars, les sursauts γ , l'émission diffuse galactique et extragalactique. L'étude de la matière noire par une éventuelle détection d'un signal du à l'annihilation de particules supersymétriques n'est pas non plus exclue.

1.2.2 Fonctionnement du LAT

Le LAT est composé de 16 tours formant un carré 4×4 enfermé dans un ACD *Anti Coincidence Detector* segmenté (Figure 1.1). Chaque tour est constituée d'un trajectographe, et d'un calorimètre. L'ACD permet la réjection des particules chargées, car seuls les photons nous intéressent lors des observations. Le trajectographe est formé de couches superposées de silicium et de tungstène, il permet à la fois de convertir le photon en paire e^+/e^- et de déterminer la direction d'origine du photon. Le calorimètre électromagnétique se compose de 8 couches croisées de 12 barreaux de CsI, ce qui lui confère une épaisseur de 8 longueurs de radiation. Le photon traverse l'ACD, est converti dans le trajectographe, puis crée une gerbe électromagnétique dans le calorimètre. Chaque électron de la gerbe électromagnétique dépose de l'énergie par ionisation dans le CsI, ce qui entraîne une production de lumière qui se propage le long de chaque barreau et que l'on récupère à chaque extrémité dans des photodiodes. En fait, chaque barreau est équipé d'une grande et d'une petite photodiode qui sont chacune reliées à deux circuits électroniques, l'un à fort gain, et l'autre à faible gain. Grâce à ces 4 voies d'électronique, le LAT pourra couvrir la large gamme d'énergie requise.

¹ Energetic Gamma Ray Experiment Telescope

² Compton Gamma Ray Observatory

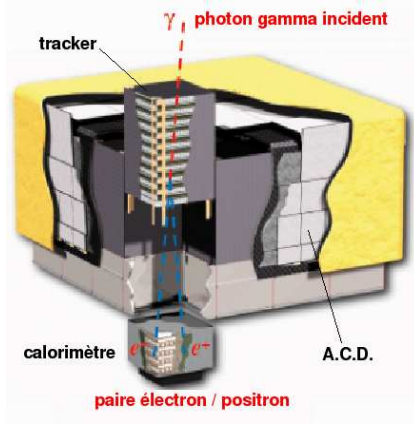


FIG. 1.1 – Vue en coupe du LAT

1.2.3 Étalonnage en énergie du LAT

Les Rayons Cosmiques

Les rayons cosmiques bombardent la Terre à chaque instant. GLAST devrait orbiter à une altitude de 550km, et devra supporter cet intense rayonnement. A cette altitude, les rayons cosmiques sont essentiellement des protons pour 95% et des noyaux d'hélium pour 5%... le reste étant constitué de noyaux plus lourds parmi lesquels des ions de Carbone, d'Oxygène, d'Azote et de Fer. Ils présentent un spectre en loi de puissance, avec une coupure basse vers 1GeV par nucléon due à la magnétosphère terrestre, et dont le maximum se situe entre 2 et 6 GeV par nucléon et avec une longue queue à plus haute énergie. Pour GLAST, en phase d'observation, le rayonnement cosmique constitue un bruit de fond important qui sera essentiellement rejeté grâce à l'ACD.

Méthode d'étalonnage en vol

Le LAT sera en partie étalonné en énergie au sol grâce à des tests faisceaux, mais l'essentiel de l'étalonnage, ainsi que son suivi, sera réalisé en vol en utilisant les ions lourds cosmiques relativistes. En effet, à plusieurs GeV par nucléon, les rayons cosmiques sont proches du minimum d'ionisation et déposent environ $Z^2 \times 12 \text{ MeV}$ dans chaque barreau de CsI traversé (Z est le numéro atomique de l'ion). Ainsi si l'on convolue le spectre du rayonnement cosmique avec la courbe dE/dx de dépôt d'énergie par ionisation (voir PDBDE [1]), on obtient un spectre multiplicatif dans lequel chaque pic distinct correspond à un ion différent mais identifiable (Figure 1.2). Chaque barreau de CsI devrait ainsi voir ce spectre à partir duquel il sera possible d'étalonner chacune des 4 voies d'électronique. L'étalonnage en énergie du CsI consiste à convertir la quantité de lumière générée dans le scintillateur, et mesurée par les photodiodes, en éner-

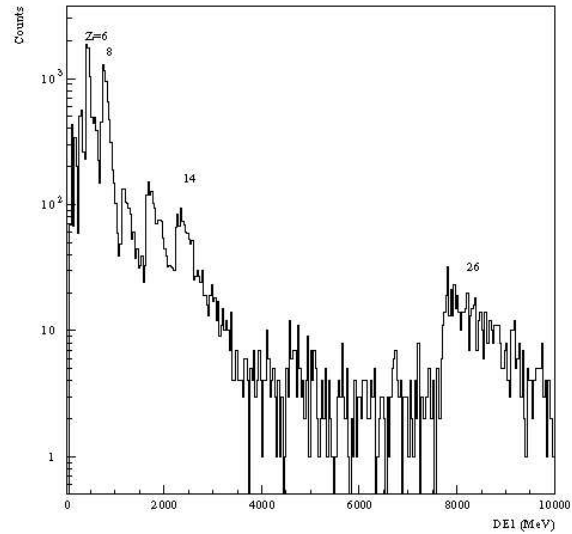


FIG. 1.2 – Simulation du spectre du rayonnement cosmique vu par un barreau de CsI en phase d'étalonnage. Les pics sont numérotés par le numéro atomique de l'ion correspondant.

gie déposée. Or, si pour les électrons, la quantité de lumière produite est directement proportionnelle au dépôt d'énergie, elle est fortement non linéaire pour les ions lourds en fonction de la nature et de l'énergie de l'ion. Cette réponse non linéaire du CsI au dépôt d'énergie des ions est appelé quenching.

Effets de quenching

Les barreaux du calorimètre de GLAST sont constitués de scintillateur CsI dopé au thallium. Les paires électron/trou issus de l'ionisation se recombinent sur des sites thallium, les atomes de thallium se désexcitent ensuite en émettant un photon. Lorsqu'un ion lourd traverse du CsI, la densité d'ionisation est très forte le long de la colonne d'ionisation si bien qu'une partie importante des paires électron/trou se recombine par d'autres voies provoquant ainsi l'effet de saturation, de quenching, de la production de lumière. Plus simplement, pour un même dépôt d'énergie dans le CsI la quantité de lumière générée par le passage d'un ion est inférieure à celle d'un électron. On définit ainsi le facteur de quenching comme le rapport de ces deux quantités de lumière $\frac{dL(ion)}{dL(e^-)}$. L'effet de quenching est connu depuis fort longtemps (voir par exemple BIRKS [2]), cependant les résultats que l'on peut trouver dans la littérature sont pour le moins divers ; il semble notamment que la méthode de mesure de la lumière (photodiode, photomultiplicateurs...) et l'électronique associée, influence fortement les valeurs extraites. Il apparaît donc nécessaire de mesurer les facteurs de quenching pour les barreaux de CsI de GLAST, pour un

maximum d'ions et sur une large gamme d'énergie de façon à comprendre au mieux la réponse des détecteurs. Dans ce cadre, quatre campagnes de faisceau-tests ont été menées, dont deux dédiées aux ions lourds : la première au GANIL³ avec des ions lourds de basse énergie (de 0 à 73 MeV/nucleon), la seconde au GSI⁴ à plus haute énergie (jusqu'à 1.7 GeV/nucleon).

1.3 Expérience ions lourds au GANIL

Le premier faisceau-test dédié à l'étude du quenching a eu lieu en avril 2003 au Grand Accélérateur National d'Ions Lourds ; soixante douze heures de faisceau ont permis de déterminer le facteur de quenching, des noyaux d'hélium aux noyaux de krypton, de 0 à 73 MeV par nucléon.

1.3.1 Méthode et Dispositif

Méthode

La méthode mise en oeuvre doit permettre à la fois la production d'ions de nature et d'énergie multiples, leur identification, ainsi que la mesure d'une référence sûre permettant la caractérisation des effets non linéaires. La production d'ions est assurée à partir d'un faisceau primaire de $^{78}_{36}Kr$ d'énergie 73 MeV par nucléon, qui traverse une cible interchangeable. Les ions de krypton provoquant des réactions nucléaires dans la cible, en aval les produits de réaction forment des ions de nature diverse, dont l'énergie est d'autant plus faible que la cible est épaisse. L'identification est réalisée par l'utilisation d'un télescope $\Delta E_{Si} - E_{CsI}$ (Figure 1.3) : les ions traversent un détecteur silicium mince dans lequel on mesure le dépôt d'énergie ΔE_{Si} , puis sont arrêtés dans le barreau de CsI en déposant l'énergie E_{CsI} . Dans le plan $\Delta E_{Si} - E_{CsI}$, les ions forment des lignes : à chaque ligne correspond un type d'ion, ce qui permet de remonter à la nature de chaque ion. De plus, le silicium n'est soumis à aucun effet de quenching, ainsi, le ΔE_{Si} complète l'identification et donne l'énergie de chaque ion en servant de référence dans un calcul de dépôt d'énergie par ionisation.

Dispositif

Pour cette expérience, nous avons utilisé un dispositif composé de deux barreaux de CsI équipés de photodiodes et associés chacun à trois détecteurs silicium. Nous disposons de six cibles d'Or et de Plomb d'épaisseur allant de 2.11 à 486.3 mg/cm² interchangeables à volonté. L'ensemble du dispositif était placé dans la

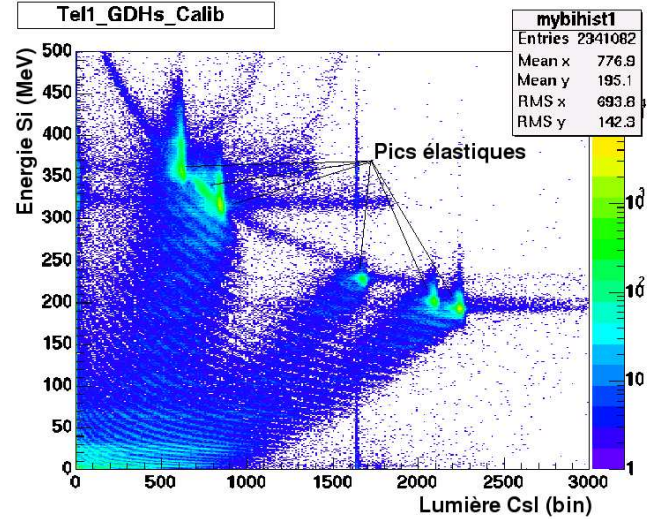


FIG. 1.3 – Carte $\Delta E_{Si} - E_{CsI}$ montrant les pics de diffusion élastique, à chaque épaisseur de cible correspond un pic, ainsi que les lignes à forte densité de coups

cuve à vide Nautilus, nécessaire car à ces énergies les ions sont arrêtés par quelques centimètres d'air.

1.3.2 Détermination du quenching

Étalonnage des détecteurs

L'étalonnage en énergie des détecteurs silicium est établi directement à partir des données faisceaux car la réponse des détecteurs silicium est linéaire et non soumise au quenching. Lorsque les ions de Krypton du faisceau traversent la cible sans provoquer de réaction nucléaire, l'interaction est uniquement de type élastique. Ce cas de figure est le plus probable ; dans les données ceci se traduit par une accumulation statistique de points dans le plan $\Delta E_{Si} - E_{CsI}$, qui forme ce que l'on appelle le pic de diffusion élastique (Figure 1.3) et dont on peut calculer précisément l'énergie en ΔE_{Si} à partir de l'énergie incidente du faisceau, de l'épaisseur de cible et de l'épaisseur de silicium traversée. Pour les détecteurs CsI, l'étalonnage en énergie a été réalisé grâce à une source ^{22}Na . En utilisant des amplificateurs appropriés, 3 pics peuvent être observés. Ils correspondent respectivement aux photons de 511 keV de l'annihilation des positrons, aux photons de désexcitation de 1275 keV et aux 1786 keV de la somme des deux photons. Par inter-étalonnage des amplificateurs et des différentes voies, on obtient ensuite l'étalonnage absolu en énergie de chacune des voies des détecteurs CsI.

Le silicium comme référence

L'étalonnage en énergie des détecteurs CsI permet d'exprimer la quantité de lumière générée dans les bar-

³Grand Accélérateur National d'Ions Lourds

⁴Gesellschaft für Schwerionenforschung

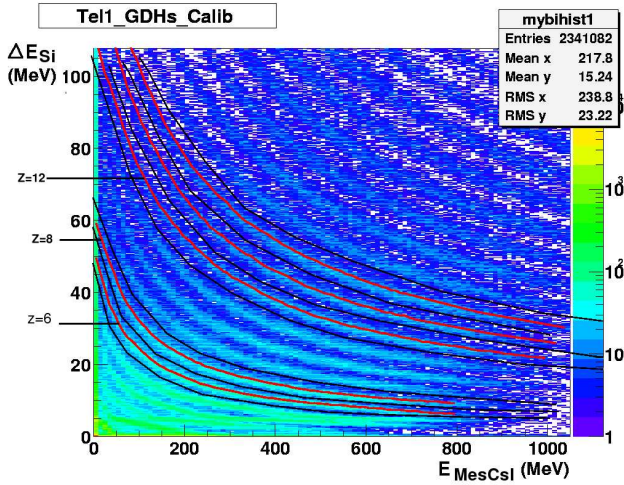


FIG. 1.4 – Extraction des lignes de corrélation $\Delta E_{Si}(E_{MesCsI})$ en rouge.

reaux en énergie MeV. Déterminer le quenching consiste à comparer cette mesure de l'énergie, à l'énergie réellement déposée dans le CsI et que l'on peut calculer en utilisant le détecteur silicium comme référence. La première étape consiste à extraire pour chaque ion la ligne de corrélation $\Delta E_{Si}(E_{MesCsI})$: on trace à la main les lignes séparatrices puis un algorithme permet de récupérer la ligne de crête qui nous intéresse (Figure 1.4). Ensuite, pour chaque point E_{MesCsI} de la ligne, on détermine le ΔE_{Si} correspondant. Un calcul de dépôt d'énergie par ionisation dans l'ensemble des détecteurs nous permet de déterminer le dépôt réel d'énergie dans le CsI ($E_{CalcCsI}$) pour ce même dépôt d'énergie dans le silicium qui sert donc de référence entre les données et le calcul. Le quenching se traduit par le fait que $E_{MesCsI} \leq E_{CalcCsI}$.

1.3.3 Résultats

L'expérience a permis la mesure du quenching pour tous les ions allant de $Z=2$ à $Z=36$ et d'énergie 0 à 73 MeV/nucleon. Les résultats sont présentés de manière simple en utilisant le facteur de quenching qui en pratique est la dérivée des courbes $E_{CalcCsI}(E_{MesCsI})$ obtenues précédemment. En l'absence de quenching, le facteur de quenching vaut donc 1. La figure 1.5 présente, pour quelques ions, les courbes de facteur de quenching obtenues au GANIL à basse énergie et complétées par les mesures réalisées au GSI à haute énergie. L'analyse de l'expérience GANIL montre des résultats conformes aux valeurs attendues, avec notamment des effets de quenching forts de plus de 30%. Les résultats GSI sont plus surprenant car on observe des facteurs de quenching supérieurs à 1 (antiquenching) mais qui

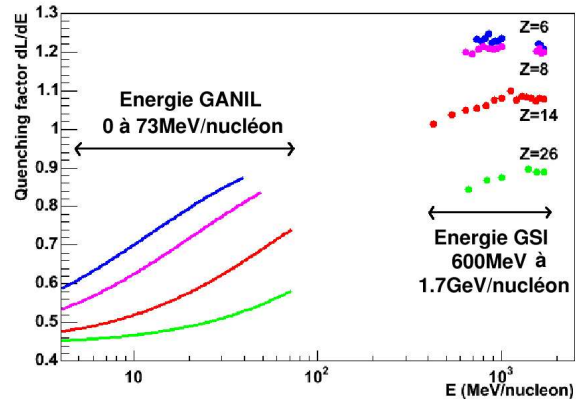


FIG. 1.5 – Facteur de quenching pour quelques ions : mesure GANIL à basse énergie, mesure GSI à haute énergie.

sont cohérents avec les mesures de plus basse énergie. Ils sont interprétés par la combinaison d'effets liés à la différence de forme de signal entre les particules faiblement ionisantes et les ions, et à la réponse de l'électronique de mesure.

1.4 Conclusion

De part son acceptance, sa résolution angulaire et sa large gamme d'énergie, GLAST devrait révolutionner l'astronomie γ dès sa mise en orbite en 2007. La réussite du projet tient notamment au suivi de l'étalonnage en énergie en vol grâce aux ions cosmiques relativistes, et à la bonne connaissance de la réponse des détecteurs CsI. Les résultats des mesures présentées dans ce document contribuent à une meilleure compréhension des effets de quenching sur une large gamme d'énergie. Les mesures réalisées au GSI pourront être extrapolées aux énergies relativistes pertinentes pour les ions cosmiques.

Remerciements

Merci à toutes les personnes qui m'ont fortement conseillé de participer à ces Journées Jeunes Chercheurs, ainsi qu'aux coordinateurs et organisateurs pour leur accueil chaleureux.

Références

- [1] Particle Data Group, Review of Particle Physics (2004), Chapitre 27. Figure 27.3
- [2] J.B. Birks, *The Theory and Practice of Scintillation Counting*, Pergamon, New York 1964