

UNIVERSITÉ MONTPELLIER II
SCIENCES ET TECHNIQUE DU LANGUEDOC

THÈSE

pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ MONTPELLIER II

Discipline : Physique des particules

Formation doctorale : Physique de la matière condensée

École doctorale : Sciences chimiques et physiques

présentée et soutenue publiquement par

Julien BOLMONT

le 14 octobre 2005

Détection des gamma dans l'expérience AMS et analyse temporelle des sursauts gamma par la mission HETE-2

Jury

Mme et MM.
Fabrice Feinstein , Président
Jean-Luc Atteia , Rapporteur
Jacques Boucrot , Rapporteur
Alain Falvard , Directeur de thèse
Agnieszka Jacholkowska , Co-directrice de thèse
Martin Pohl , Examineur

À mes parents et grand-parents

Avant-propos

Eternity is really long, especially near the end.
Woody Allen

Une thèse, c'est vraiment court... Surtout à la fin.
Julien Bolmont

Lorsque j'ai commencé mon stage de DEA en mars 2002, le LPTA, *Laboratoire de Physique Théorique et Astroparticules* n'existait pas encore. À l'époque, six permanents, deux post-docs et deux autres stagiaires de DEA composaient tout l'effectif du GAM, le *Groupe d'Astroparticules de Montpellier*.

Et puis le GAM a grandi. Au début de ma deuxième année, nous avons déménagé dans des locaux plus grands et de nouveaux permanents sont arrivés. Centrées sur l'expérience CELESTE à la création du laboratoire en 2000, les activités ont ensuite évolué vers des expériences de pointe de l'astronomie gamma et des rayons cosmiques au sol et en vol : AMS-02, HESS et GLAST.

Finalement, début 2005, le *Laboratoire de Physique Mathématique* et le GAM ont fusionné pour former le LPTA.

Chaque année de ma thèse a donc vu une évolution majeure du laboratoire. Le petit groupe du début est devenu une grande équipe couvrant des disciplines variées mais complémentaires.

Alors que j'écris ces lignes, j'ai quitté Montpellier et son soleil, mais je sais que les trois années que j'y ai passées sont parmi les plus enrichissantes de ma vie, à tous les points de vue. Aussi, j'aimerais remercier ici toutes les personnes qui ont fait de cette expérience une belle expérience : Agnieszka Jacholkowska et Alain Falvard (mes directeurs de thèse) et par ordre alphabétique : Michèle Bourgeat, Richard Britto, Javier Bussons-Gordo, Sylviane Colaiocco, Fabrice Feinstein (mon président de jury), Yves Gallant, Edmond Giraud, Sylvain Guiriec, Eric Nuss, Frédéric Piron, Saeeda Sajjad, Mariusz Sapiński et Claude Zurbach.

Pour terminer ce petit préambule, je voudrais encore remercier Jacques Boucrot et Jean-Luc Atteia, qui ont bien voulu être mes rapporteurs, Martin Pohl pour sa participation au jury et la collaboration HETE-2 pour m'avoir donné accès aux données photon-photon de FREGATE.

Cette thèse est disponible sur Internet au format pdf, sur le serveur de thèse multidisciplinaire du CNRS : <http://tel.ccsd.cnrs.fr/>, domaine Astroparticule et cosmologie.

Table des matières

| | |
|---|----|
| <i>Avant-propos</i> | 5 |
| <i>Introduction</i> | 13 |
| <i>I Le cadre</i> | 17 |
| 1 Astronomie gamma | 21 |
| 1.1 Historique | 22 |
| 1.2 Les mécanismes de production | 26 |
| 1.3 Les différentes sources de rayonnements gamma | 27 |
| 1.3.1 Sources gamma galactiques | 27 |
| 1.3.2 Sources gamma extragalactiques | 28 |
| 1.4 Détection | 29 |
| 1.4.1 Interactions des photons avec la matière | 30 |
| 1.4.2 Observation au sol ou en vol ? | 30 |
| 1.4.3 Techniques d'observation au sol | 32 |
| 1.4.4 Techniques d'observation en vol | 35 |
| 2 Sursauts gamma : état actuel des connaissances | 39 |
| 2.1 Introduction | 39 |
| 2.2 Historique | 40 |
| 2.2.1 Les découvertes fortuites | 40 |
| 2.2.2 Les observations systématiques | 40 |
| 2.2.3 Détecteurs actuels | 43 |
| 2.2.4 Un mot sur l'IPN | 44 |
| 2.3 Caractéristiques principales des GRB | 45 |

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 2.3.1 | Isotropie dans le ciel | 45 |
| 2.3.2 | Durées et duretés | 45 |
| 2.3.3 | Propriétés temporelles | 46 |
| 2.3.4 | Spectres | 48 |
| 2.3.5 | Afterglows | 48 |
| 2.3.6 | Redshifts | 49 |
| 2.4 | Lien avec les Supernovae | 51 |
| 2.5 | Un mot sur les modèles | 53 |
| 2.6 | Conclusions | 54 |
| 3 | Un détecteur sur la Station Spatiale Internationale | 55 |
| 3.1 | Le vol précurseur | 55 |
| 3.1.1 | Le détecteur AMS-01 | 57 |
| 3.1.2 | Les principaux résultats d'AMS-01 | 59 |
| 3.2 | AMS-02 | 61 |
| 3.2.1 | Description | 61 |
| 3.2.2 | Buts physiques | 66 |
| 3.3 | Conclusions | 67 |
| 4 | La mission HETE-2 | 69 |
| 4.1 | Introduction | 69 |
| 4.2 | Description | 70 |
| 4.2.1 | Instruments scientifiques | 71 |
| 4.2.2 | Alimentation électrique et contrôle d'attitude | 73 |
| 4.3 | La détection d'un sursaut par FREGATE | 73 |
| 4.3.1 | Le déclenchement | 74 |
| 4.3.2 | Le dispositif au sol | 74 |
| 4.3.3 | Les alertes | 74 |
| | Références | 77 |
| II | <i>AMS-02, détecteur de photons</i> | 83 |
| 5 | La détection des photons avec AMS | 87 |
| 5.1 | Les détecteurs | 87 |
| 5.1.1 | Le STD | 87 |
| 5.1.2 | Le calorimètre électromagnétique | 88 |
| 5.2 | Les deux modes de détection des photons | 89 |
| 5.2.1 | Le mode conversion | 89 |
| 5.2.2 | Le mode photon unique | 90 |
| 5.3 | Acceptances, résolutions | 91 |
| 6 | Étalonnage du calorimètre électromagnétique | 93 |
| 6.1 | Introduction | 93 |
| 6.2 | Description du dispositif expérimental | 94 |
| 6.3 | Les données disponibles | 96 |
| 6.4 | Étude des stabilités | 96 |

| | | |
|--|---|------------|
| 6.4.1 | Stabilité des piédestaux | 96 |
| 6.4.2 | Étude du MIP avec les protons et les antiprotons | 100 |
| 6.5 | Comparaison des données du test avec la simulation MC | 108 |
| 6.5.1 | Données | 109 |
| 6.5.2 | Sélections sur les données | 109 |
| 6.5.3 | Détermination de la constante de calibration | 111 |
| 6.5.4 | Comparaison données/MC pour l'énergie totale déposée | 111 |
| 6.5.5 | Comparaison données/MC pour les profils de gerbe | 112 |
| 6.6 | Correction des pixels défectueux avec le signal de dynode | 119 |
| 6.6.1 | Étude du signal de dynode | 119 |
| 6.6.2 | Correction | 119 |
| 6.7 | Conclusions | 121 |
| 7 | Une simulation rapide pour AMS-02 | 123 |
| 7.1 | Introduction | 123 |
| 7.2 | Méthode | 124 |
| 7.2.1 | Simuler l'orbite de l'ISS | 124 |
| 7.2.2 | Flux d'une source | 127 |
| 7.2.3 | Paramétrisation de l'acceptance et de la résolution angulaire | 128 |
| 7.2.4 | Calcul du nombre de photons détectés pour une source | 130 |
| 7.2.5 | Emission gamma diffuse | 130 |
| 7.2.6 | Significativité | 131 |
| 7.3 | Prédictions | 133 |
| 7.3.1 | Prédictions pour les sources EGRET | 133 |
| 7.3.2 | Annihilations de neutralinos au centre galactique | 134 |
| 7.4 | Conclusions | 141 |
| | Références | 143 |
| <i>III Sursauts gamma et gravitation quantique</i> | | <i>145</i> |
| 8 | Sursauts gamma et gravitation quantique | 149 |
| 8.1 | Introduction | 149 |
| 8.2 | Gravitations quantiques | 149 |
| 8.3 | Un modèle particulier | 150 |
| 8.3.1 | Gravitons et D-branes | 150 |
| 8.3.2 | Effets cosmologiques | 152 |
| 8.4 | Tester les modèles | 153 |
| 8.4.1 | Avec les sursauts gamma | 153 |
| 8.4.2 | Les autres tests possibles | 154 |
| 8.5 | Quelques résultats déjà publiés | 155 |
| 9 | Données et méthode d'analyse | 157 |
| 9.1 | Introduction | 157 |
| 9.2 | Données et analyses préliminaires | 157 |
| 9.2.1 | Les données | 157 |
| 9.2.2 | Détermination des intervalles d'étude | 159 |

| | | |
|--------|--|------------|
| 9.2.3 | Choix des bandes d'énergie | 161 |
| 9.2.4 | Étude des spectres | 161 |
| 9.3 | Méthode : débruitage et localisation des extrema | 161 |
| 9.3.1 | Débruitage et transformée en ondelettes discrètes | 162 |
| 9.3.2 | Recherche d'extrema et transformée en ondelettes continues | 164 |
| 10 | Analyse temporelle des sursauts d'HETE-2 : résultats | 167 |
| 10.1 | Introduction | 167 |
| 10.2 | Étude statistique des données photon-photon | 167 |
| 10.3 | Analyse en ondelettes et sélections | 168 |
| 10.3.1 | Sélections | 170 |
| 10.4 | Résultats | 172 |
| 10.4.1 | Δt en fonction de K_l | 172 |
| 10.4.2 | Détermination d'une limite sur E_{QG} par minimisation de χ^2 | 173 |
| 10.5 | Discussion | 177 |
| 10.5.1 | Effets systématiques | 177 |
| 10.5.2 | À propos des effets source | 178 |
| 10.6 | Conclusions | 179 |
| | Références | 181 |
| | Conclusions | 183 |
| | Annexes | 187 |
| A | Runs physiques et piédestaux du test faisceau de juillet 2002 | 189 |
| B | AMSFS : informations techniques | 201 |
| B.1 | Structure | 201 |
| B.2 | Utilisation | 202 |
| B.2.1 | Chargement de la librairie et des paramètres d'entrée | 203 |
| B.2.2 | Déclaration des détecteurs | 203 |
| B.2.3 | Déclaration des sources | 203 |
| B.2.4 | Lancement de la simulation | 203 |
| B.3 | amsfs.conf | 204 |
| C | La transformée en ondelettes | 209 |
| C.1 | Introduction | 209 |
| C.1.1 | Limites de la transformée de Fourier | 209 |
| C.1.2 | La transformée de Fourier par fenêtres | 211 |
| C.2 | Transformées en ondelettes | 211 |
| C.2.1 | Définition de la transformée en ondelettes continues | 212 |
| C.2.2 | Un mot sur la CWT de signaux discrets | 213 |
| C.2.3 | Définition de la transformée en ondelettes discrètes | 215 |
| C.3 | Ondelettes est analyse de signaux | 218 |
| C.3.1 | DWT et débruitage | 218 |

| | |
|---|-----|
| <i>Table des matières</i> | 11 |
| C.3.2 CWT et recherche d'extrema | 220 |
| D LastWave ou WaveLab ? | 225 |
| D.1 WaveLab | 225 |
| D.1.1 Avantages, inconvénients | 225 |
| D.1.2 La procédure de débruitage | 226 |
| D.2 LastWave | 226 |
| D.2.1 Avantages, inconvénients | 226 |
| D.2.2 La procédure de recherche des extrema | 227 |
| Références | 231 |
| <i>Table des figures</i> | 233 |
| <i>Liste des tableaux</i> | 239 |
| <i>Index</i> | 241 |

Introduction

Il y a 50 ans passés, le CERN, l'Organisation Européenne pour la Recherche Nucléaire, naissait d'une collaboration de douze pays. On savait déjà alors qu'étudier la matière dans ses détails les plus fins nécessiterait des équipements aussi gros et perfectionnés que coûteux et que le seul moyen de pouvoir les réaliser serait d'allier les ressources financières de plusieurs pays et les efforts de diverses communautés de physiciens.

Aujourd'hui en 2005, le CERN construit le grand collisionneur de hadrons, le LHC. Cet appareil utilisera des aimants supraconducteurs refroidis avec de l'hélium superfluide et permettra à partir de 2007 de produire des faisceaux de protons d'une énergie de 14 TeV en mode collisionneur. Le LHC sera alors l'accélérateur permettant d'atteindre les énergies les plus élevées. Rechercher les énergies les plus hautes permettra de produire des particules lourdes d'un nouveau type : particules supersymétriques, bosons de Higgs, mini trous noirs. Cela permettra de tester les théories de physique des particules actuelles ou futures et de sonder toujours plus profondément les constituants de la matière. Toutefois, plus les énergies augmentent, plus les machines sont complexes. C'est pourquoi depuis quelques années, les physiciens des particules, conscients que la nouvelle physique ne se fera pas forcément dans un laboratoire souterrain, se tournent vers l'étude des particules venues de l'Univers, les astroparticules.

Qu'elles soient émises par le Soleil ou par des phénomènes astrophysiques violents à des distances cosmologiques, les astroparticules sont produites par la nature et peuvent permettre de sonder des domaines de la physique des particules encore inconnus.

Le détecteur spatial AMS-02, qui sera installé sur la Station Spatiale Internationale début 2008 permettra d'explorer cette nouvelle physique. Fruit d'une collaboration de près de 500 physiciens, dont un bon nombre travaillait sur les expériences sur accélérateur, AMS sera chargé d'étudier les rayons cosmiques chargés. Il recherchera la matière noire et l'antimatière primordiale présentes dans l'Univers. En outre, il sera capable de détecter des photons entre environ 1 GeV et 300 GeV et il aura accès à différents types de sources astrophysiques comme les pulsars ou les sursauts gamma.

Avec des énergies de l'ordre de 10^{51} ergs libérées en rayonnement gamma en un temps assez court, les sursauts gamma sont les événements astrophysiques les plus violents jamais observés. Les photons qu'ils émettent parcourent des distances cosmologiques avant de nous parvenir et pourraient nous permettre de sonder l'Univers à grande échelle (par exemple en signalant les galaxies à grande distance) et d'explorer la physique au-delà du Modèle Standard.

Même s'il a fait ses preuves depuis plus de 50 ans, le Modèle Standard de la physique des particules possède une faille importante : il ne permet pas d'unifier la théorie relativiste de la gravitation (la relativité générale) avec la mécanique quantique. Pour concilier la physique de l'infiniment petit avec la physique de l'infiniment grand, plusieurs approches ont été développées. Les modèles de gravitation quantique sont fondamentalement différents mais certains sont d'accord pour prédire que la structure fine de l'Univers (typiquement à l'échelle de Planck) pourrait engendrer une violation de la symétrie de Lorentz. Cette violation se traduirait par un effet observable : des photons d'énergies différentes voyageraient à des vitesses différentes. Une source gamma à la fois variable et lointaine, comme un sursaut gamma, pourrait permettre de tester ces modèles.

A partir d'octobre 2002, et pendant trois ans, j'ai mené un travail de thèse intitulé : **“ Détection des gamma dans l'expérience AMS et analyse temporelle des sursauts gamma par la mission HETE-2 ”**. Comme le suggère le titre, cette thèse s'articule autour de deux grandes parties. La première concerne les capacités de détection en gamma du détecteur AMS-02 et la seconde présente l'analyse temporelle de douze sursauts gamma observés par le

satellite HETE-2 pour lesquels une mesure de *redshift* est disponible. Cette dernière étude a été menée dans le but de rechercher un effet de Gravitation Quantique sur la propagation des photons.

Le présent mémoire est composé de trois grandes parties.

La première partie donne le cadre du travail de thèse et permet d'éclairer les différentes notions évoquées dans le titre. Le premier chapitre donnera un aperçu des méthodes utilisées en astronomie gamma et décrira rapidement les différents objets astrophysiques émettant des photons de haute énergie. Le deuxième chapitre donnera l'état actuel des connaissances en ce qui concerne les sursauts gamma. Le troisième chapitre portera sur l'expérience AMS-02, et le quatrième évoquera le satellite HETE-2.

La deuxième partie concerne plus particulièrement AMS-02 en tant que détecteur de photons. Nous verrons au premier chapitre comment son trajectographe et son calorimètre électromagnétique détecteront les gamma et nous donnerons leurs performances attendues. Le deuxième chapitre sera consacré à la calibration au sol du calorimètre. J'exposerai les résultats de mon analyse des données du test sur faisceau de Juillet 2002 au CERN. Une partie de ce travail de thèse a consisté à développer un simulateur rapide pour évaluer les performances d'AMS pour différents types de sources gamma comme les pulsars, les blazars ou les photons dus à l'annihilation de particules supersymétriques dans les régions centrales de la Galaxie. Je décrirai ce simulateur et donnerai des prédictions dans le troisième chapitre.

Après son lancement en 2008, AMS-02 aura la possibilité d'observer des sources gamma entre 1 GeV et environ 300 GeV. Compte tenu de ses performances, on pense qu'il pourra observer quelques sursauts par an et que ces observations permettront peut-être de tester les modèles de Gravitation Quantique.

La troisième partie de cette thèse décrit une étude temporelle des données du satellite HETE-2 effectuée sur douze sursauts. En utilisant l'analyse en ondelettes, et en considérant un modèle particulier issu de la Théorie des Cordes, nous avons pu donner de nouvelles limites sur l'échelle de Gravitation Quantique. Le premier chapitre de cette partie décrira le modèle utilisé et montrera pourquoi les sursauts gamma sont de bons candidats pour le tester. Le deuxième chapitre évoquera les données du satellite HETE-2 utilisées pendant l'étude et expliquera la méthode suivie pour analyser les courbes de lumière des sursauts. Enfin, le troisième chapitre donnera les résultats obtenus concernant l'échelle de gravitation quantique.