

**“Les accélérateurs cosmiques au lycée”  
COSMIX/COSMAX**

Janvier 2013

**Benoit Lott, [lott@cenbg.in2p3.fr](mailto:lott@cenbg.in2p3.fr)  
Denis Dumora, [dumora@cenbg.in2p3.fr](mailto:dumora@cenbg.in2p3.fr)  
Romain Rousseau, [rousseau@cenbg.in2p3.fr](mailto:rousseau@cenbg.in2p3.fr)**

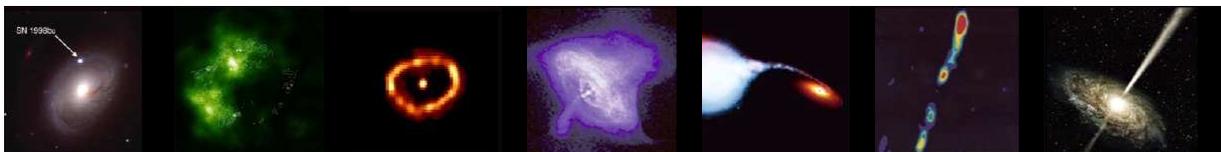
**Centre d’Etudes Nucléaires de Bordeaux Gradignan  
IN2P3/CNRS - Université de Bordeaux 1**

## Introduction

Le projet Cosmix/Cosmax a pour ambition de contribuer au rapprochement du monde de la recherche de celui de l'éducation secondaire. De ce fait, il s'adresse en priorité aux professeurs de physique des lycées. Il présente deux facettes. L'une est pratique et consiste à prouver l'existence des rayons cosmiques au moyen d'un détecteur d'utilisation très simple. L'autre, plus observationnelle, est basée sur l'utilisation des données du satellite spatial Fermi détectant des rayons gamma pour réaliser des cartes du ciel et mettre en évidence des événements cosmiques intéressants (sursauts solaires, sursauts gamma, éruptions de noyaux actifs de galaxie, novas...). Le but du projet est de sensibiliser les lycéens aux phénomènes très violents de l'Univers, qui présentent tous des propriétés extraordinaires, et dont la grande variabilité temporelle (ou le caractère temporaire) de certains d'entre eux tranche avec l'apparente immuabilité du ciel communément observée.

Les rayons cosmiques détectés sur Terre constituent la preuve la plus directe (et historiquement la plus ancienne, puisque le centième anniversaire de leur découverte a été célébré en 2012) de l'existence d'«accélérateurs cosmiques» dans l'Univers. La nature de ces accélérateurs est restée longtemps un mystère, principalement parce que les rayons cosmiques sont défléchis de manière aléatoire dans les champs magnétiques omniprésents dans l'Univers. L'information associée à leur direction d'émission par rapport à la Terre est alors perdue.

Les rayons gamma constituent un moyen privilégié d'étudier les accélérateurs cosmiques, qu'ils soient à l'origine des rayons cosmiques observés sur Terre ou non: ces rayons sont produits uniquement par des particules de très grande énergie interagissant avec la matière, des champs magnétiques ou des radiations de basse énergie (comme la lumière) et ne subissent pas de déflexion en traversant les champs magnétiques. Différentes classes d'accélérateurs ont ainsi été observés grâce aux rayons gamma incluant les pulsars, restes de supernova, binaires X, nova, noyaux actifs de galaxie, sursauts gamma... Grâce à ses données d'une qualité exceptionnelle, le télescope Fermi-LAT (Large Area Telescope) a permis de faire un bond important dans notre connaissance de ces objets. La possibilité d'explorer de manière élémentaire des données du Fermi-LAT repose sur plusieurs caractéristiques particulières de ces données: elles sont publiques (ainsi que tous les outils d'analyse), couvrant tout le ciel (un balayage complet toutes les 3 heures), assez facile à comprendre (consistant en une simple liste de paramètres de photons: coordonnées dans le ciel, énergie, date de détection...) et disponibles rapidement (moins de 12 heures entre la détection et la mise à disposition sur internet). Il est ainsi possible pour des non-spécialistes de générer des cartes du ciel entier (ou de régions restreintes du ciel) telles que celles illustrant la plupart des communiqués de presse issus du Fermi-LAT, portant par exemple sur des événements éphémères particulièrement intéressants (par exemple des éruptions violentes de différentes sources). Le ciel peut également être observé « en direct » en utilisant les toutes dernières données produites (la liste des sources variables détectées à un moment donné est affichée sur le blog de Fermi <http://fermisky.blogspot.co.at/>). L'évolution de la luminosité de ces phénomènes en fonction du temps peut également être suivie



## Le détecteur de muons (Cosmix)

Le projet Cosmix vise à mettre à disposition des professeurs de lycée des détecteurs de muons du rayonnement cosmique très simple d'utilisation. Ces détecteurs mettent à profit le « recyclage » de barreaux de scintillateur CsI et leur électronique associée, utilisés précédemment pour des tests avant le lancement de Fermi en 2008. Ces barreaux sont exactement similaires à ceux équipant le calorimètre du Fermi-LAT, mesurant l'énergie des rayons gamma. Au passage d'une particule chargée, un barreau de scintillateur produit de la lumière visible, convertie en charge électrique par des photodiodes situées à chacune des extrémités. Pour une incidence verticale, les muons (qui ont une énergie moyenne d'environ 4 GeV et un flux de  $1 \text{ cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$ ) déposent une énergie d'environ 12 MeV dans le détecteur. Il est à noter que c'est grâce à cette technique de détection des muons au sol que le LAT a été calibré<sup>1</sup> avant son vol. Les impulsions électroniques ainsi produites peuvent être facilement visualisées par les oscilloscopes disponibles dans la plupart des lycées. Si l'on superpose plusieurs détecteurs, des coïncidences peuvent être réalisées pour démontrer que les trajectoires des muons sont préférentiellement verticales. L'existence de gerbes atmosphériques peut également être mise en évidence avec des détecteurs éloignés, deux particules différentes étant alors détectées simultanément. L'alimentation électrique est faite par un simple câble micro-USB. Le dispositif est robuste et très simple à utiliser, sans aucun réglage. Il est très facilement transportable, avec des dimensions approximatives de 42 cm x 15 cm x 5 cm et un poids de 2 kg.

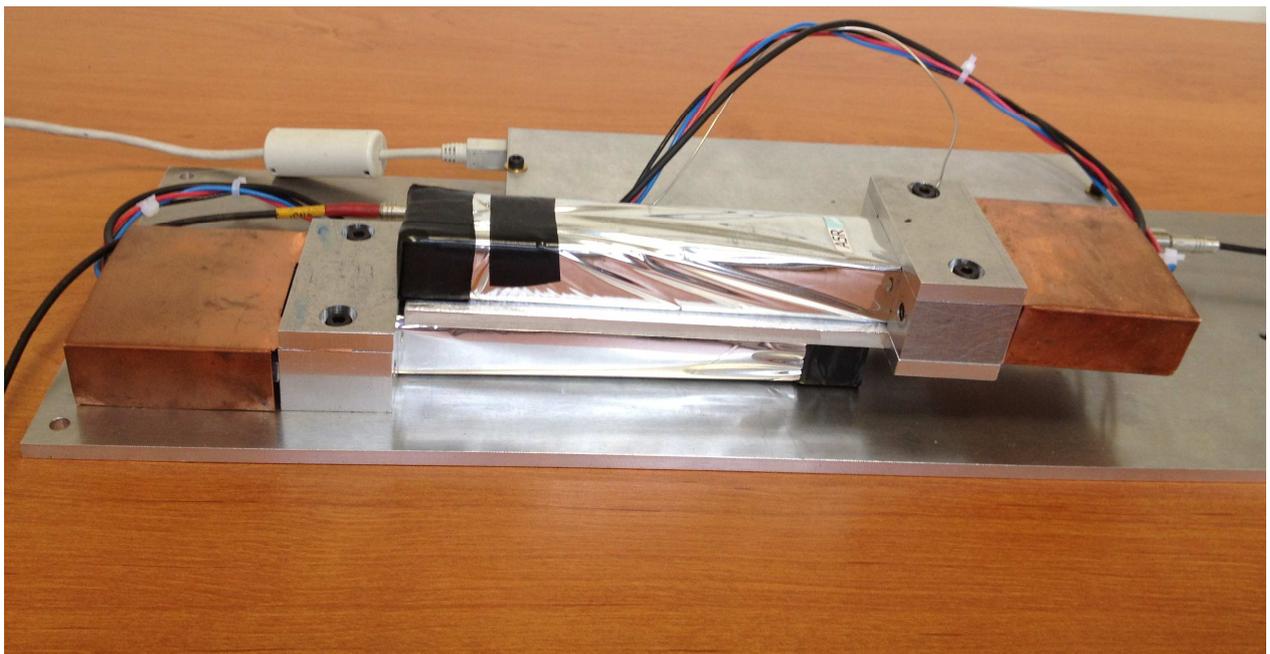


Figure 1 Photo du prototype de détecteur de muons avec les deux barreaux superposés.

---

<sup>1</sup> Dans ce cas, la calibration consistait à établir la correspondance entre l'amplitude des signaux électroniques enregistrée par le système d'acquisition des données et le dépôt d'énergie (en MeV) dans le détecteur.

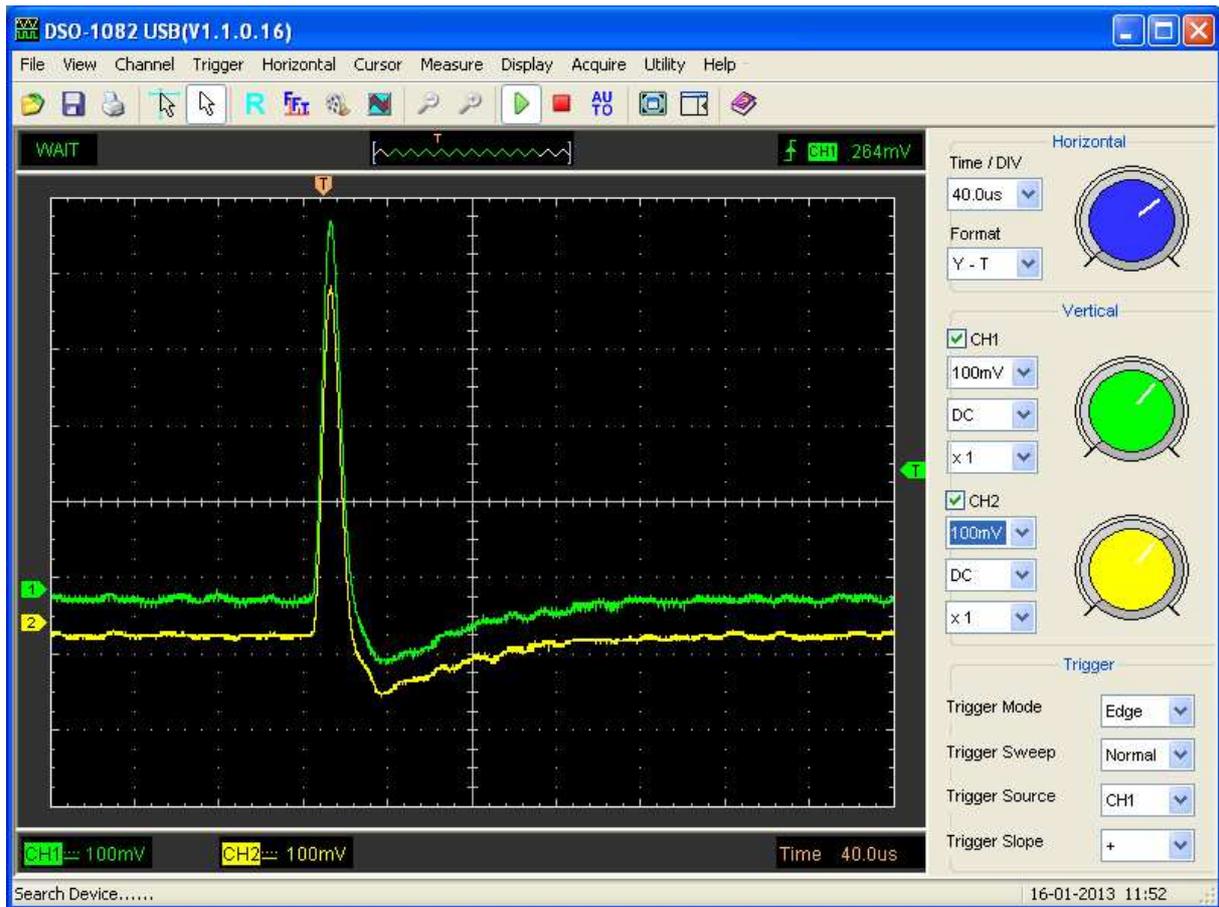


Figure 2 Capture d'écran d'un oscilloscope montrant la coïncidence des signaux provenant de deux barreaux superposés.

# Tutoriel de l'exploration des données du LAT (projet Cosmax)

## Contexte

- Le satellite Fermi orbite la Terre à une altitude de 565 km, ce qui correspond à une période de 96.5 min. Il a été lancé par la NASA le 11 Juin 2008 (la mission s'appelait alors GLAST) et devrait continuer à prendre des données au moins jusqu'en 2016. Son instrument principal, le LAT (Large Area Telescope) détecte les rayons gamma dont l'énergie est supérieure à 30 MeV. Le champ de vue du LAT est de l'ordre de 20% du ciel à un moment donné. En mode de « balayage », il pivote sur son axe à chaque orbite pour couvrir alternativement les deux hémisphères du ciel et ainsi l'intégralité du ciel toutes les 3 heures. La couverture du ciel est approximativement uniforme à environ 30% près.
- Les rayons gamma sont détectés un photon à la fois, avec des techniques venant de la Physique des particules. Les photons sont rares: avec une surface d'environ  $1 \text{ m}^2$  le LAT ne détecte en moyenne que 3 photons par seconde, alors que les rayons cosmiques détectés dans le même temps sont approximativement 1000 fois plus nombreux.
- Quand ils pénètrent dans le détecteur, la majorité des photons se convertissent en paires électrons-positons (une application de la fameuse formule d'Einstein  $E=mc^2$ ). La direction initiale et l'énergie du photon va être « reconstruite » grâce à des algorithmes sophistiqués à partir des signaux laissés par les électrons et positons dans les deux principaux éléments du LAT, appelés trajectographe et calorimètre. Un troisième élément, le bouclier d'anticoincidence permet de savoir si la particule ayant pénétré dans le LAT est chargée ou non, et ainsi de faire une discrimination entre rayons cosmiques (chargés) et rayons gamma (électriquement neutres).
- La précision avec le LAT peut mesurer la direction de provenance d'un photon (sa résolution angulaire) dépend fortement de l'énergie et varie entre  $0.2^\circ$  à haute énergie (au-delà de 10 GeV) et environ  $5^\circ$  à 100 MeV. Cela explique que même les sources ponctuelles apparaissent sous forme de taches étendues sur les cartes du ciel.
- Les données du LAT peuvent être téléchargées pour chaque semaine de la mission (à partir de la semaine 9, c'est-à-dire le début de la période opérationnelle du LAT en Aout 2008) à l'URL: <http://heasarc.gsfc.nasa.gov/FTP/fermi/data/lat/weekly/photon/><sup>2</sup> Pour information, les fichiers contenant les paramètres du satellite, comme sa position, son orientation..., correspondants (optionnels pour la suite) sont téléchargeables à l'URL suivante: <http://heasarc.gsfc.nasa.gov/FTP/fermi/data/lat/weekly/spacecraft/><sup>3</sup>.
- Le temps de détection des photons est exprimé en « mission elapsed time » (MET), temps par rapport à un temps de référence fixé arbitrairement au 1<sup>er</sup> Janvier 2001<sup>4</sup>.
- La direction de provenance des photons dans le ciel est exprimée en coordonnées célestes : ascension droite (notée RA), déclinaison (notée DEC) équivalents de la longitude et latitudes, le plan de référence étant également le plan de l'équateur, ou en coordonnées galactiques : longitude galactique, notée L, et latitude galactique, notée B (le plan de référence étant dans ce cas le plan de notre Galaxie).

---

<sup>2</sup> Un programme utilitaire, « fetch », installé sur la machine VMware permet de réaliser ce téléchargement automatiquement pour une semaine donnée.

<sup>3</sup> L'utilitaire « fetch\_sat » permet de réaliser ce téléchargement automatiquement pour une semaine donnée.

<sup>4</sup> Les utilitaires Date\_to\_MET and MET\_to\_Date permettent de convertir la date et l'heure (en temps universel) en MET et inversement.

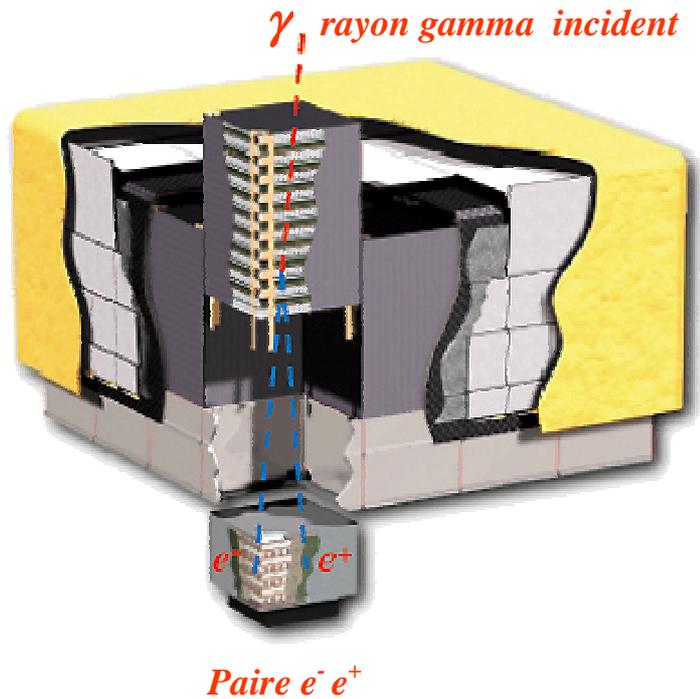


Figure 3 Schéma éclaté du Fermi-LAT. Le télescope est constitué de 16 éléments, composés chacun d'un trajectographe (partie supérieure) et d'un calorimètre (partie inférieure). Un système d'anticoïncidence (tuiles en gris clair) entoure la partie supérieure et est recouverte d'un bouclier de protection contre les micro-météorites (en jaune).

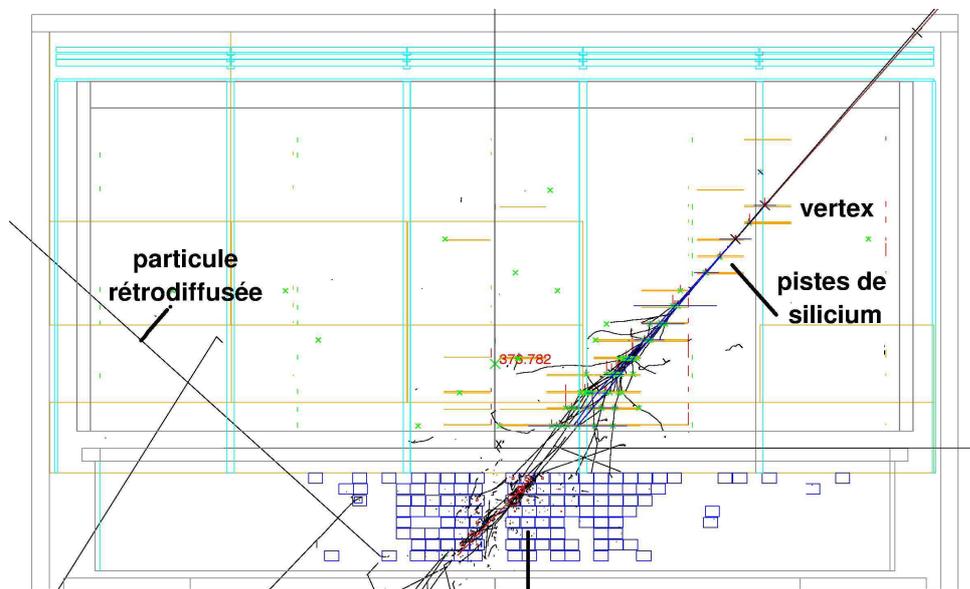


Figure 4 Résultat de la simulation d'un photon de 5 GeV détecté par le LAT.

## Installation de la machine virtuelle

### *Configuration requise*

- Windows XP ou version plus récente avec une connexion internet.<sup>5</sup>
- version VmWare Player-5.x ou plus récente (gratuite pour Windows et linux),  
<http://www.vmware.com>
- au moins 1Go de RAM pour la machine virtuelle (la mémoire peut être changée par le menu « Virtual Machine » puis « Virtual MachineSettings », « Memory » voir figure ci dessous)
- au moins 10 Go d'espace disque libre
- une résolution d'écran de 1280x1024 (qui peut être changée avec les privilèges « root »)

### *Téléchargement*

- télécharger le fichier zippé <ftp://www.cenbg.in2p3.fr/astropart/VM/sl5.7z>
- « dézipper » le fichier avec 7Zip (gratuit: <http://www.7-zip.org/>)
- télécharger la dernière version de VMwarePlayer pour Windows PC, VMware Fusion pour MAC (<http://www.vmware.com/fr/products/player/>) ou VirtualBox (<https://www.virtualbox.org/>)

### *Installation*

- Installer VMwarePlayer, VMwareFusion ou VirtualBox
- Décompresser les fichiers .zip sous un répertoire
- Les fichiers .zip peuvent ensuite être effacés.

### *Utilisation*

- Exécuter VMware Player (ou VirtualBox) pour ouvrir la machine virtuelle (ou double cliquer sur le fichier SL5.7.vmx). La première fois, si le message « Copied or Moved machine ? » apparaît, cliquer sur « Copied ».
- Une fois la machine démarrée, vous avez accès à un vrai système SL5, avec le réseau internet si votre machine Windows est connectée.
- Ouvrir la session prédéfinie, nom: local1, mot de passe :local1
- L'analyse peut commencer.

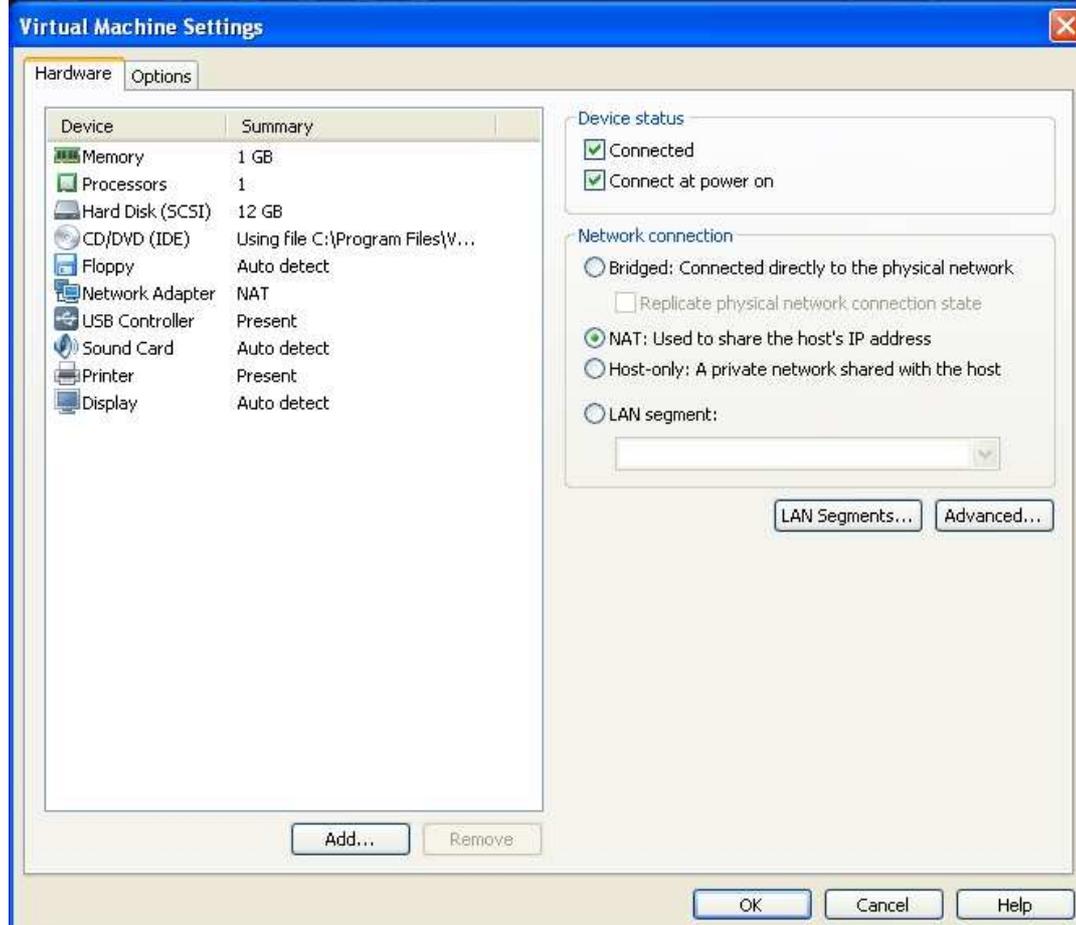
### *Quelques informations pratiques :*

- La configuration de la session est définie dans /home/local1/.ucshrc.
- Le mot de passe "root" est 'scilinux5.7'.
- On peut passer de la machine virtuelle à Windows en cliquant dans les fenêtres respectives.
- Il est possible de définir un répertoire d'échange entre Windows et la machine virtuelle Linux de la manière suivante :  
Sur le menu de la machine virtuelle linux, sélectionner "Virtual Machine Settings" (ou alternativement taper CTRL-D), puis "Options", "Shared Folders", s'assurer que l'option "Always enabled" est cochée, puis sélectionner "Add" et choisir un chemin de repertoire sous Windows avec un nom comme « Echanges » puis « Finish ». Le nom du repertoire apparait sous "Host Path". Cliquer sous OK (voir figure ci-dessous).
- Dans votre session, le repertoire d'échange se trouve sous /mnt/hgfs/Echange

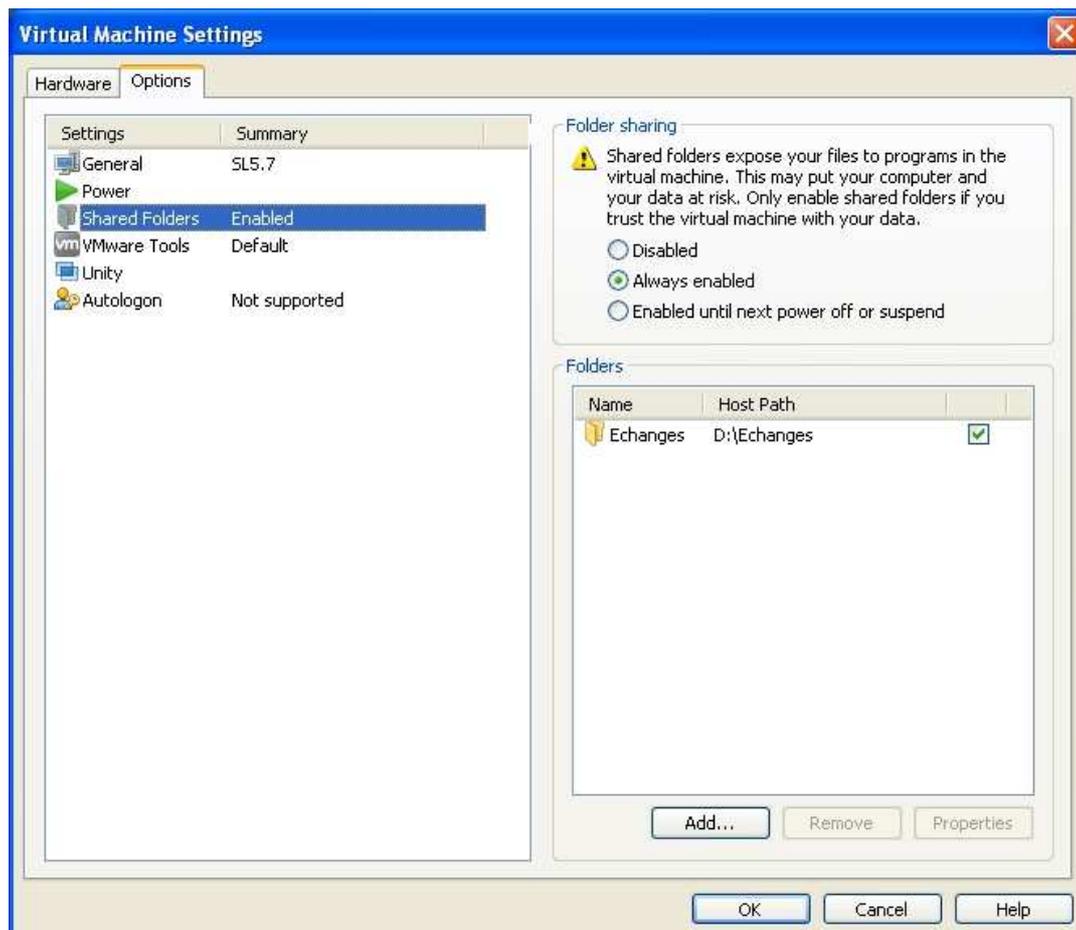
---

<sup>5</sup> - Sur des PC anciens, la fonctionnalité « Virtualization Technology » peut ne pas être autorisée. Voir <http://www.sysprobs.com/disable-enable-virtualization-technology-bios> pour corriger ce problème.

**Figure 5. Page "Hardware" de la configuration de la machine virtuelle (Virtual Machine Settings) .**



**Figure 6. Page "Options" de la configuration de la machine virtuelle (Virtual Machine Settings)**



## Données

Les fichiers de données du LAT, de format fits, sont stockés dans le répertoire fits\_file (les fichiers des paramètres du satellite étant dans fits\_file\_sat). Ils se présentent sous la forme : lat\_photon\_weekly\_wxxx\_p130\_v001.fits (ou lat\_photon\_weekly\_wxxx\_p130\_v001\_filt.fits) où xxx est le numéro de la semaine.

Nota : Il n'est pas nécessaire de maîtriser linux (ou UNIX) pour ce projet, cependant la connaissance de commandes simples telles que cd, ls, cp, mv, rm... simplifiera grandement la vie de l'utilisateur.

## Exploration des données

Ouvrir un des fichiers de données hebdomadaires (ici pour la semaine 15) avec le programme fv<sup>6</sup> (« fits viewer ») :

- fv fits\_file/lat\_photon\_weekly\_w015\_p130\_v001\_filt.fits

Les deux panneaux grisés représentés ci-contre apparaissent. Le panneau horizontal correspond au contenu du fichier ouvert. Sur la ligne Index=1 (Extension=EVENTS), cliquer sur « All ».

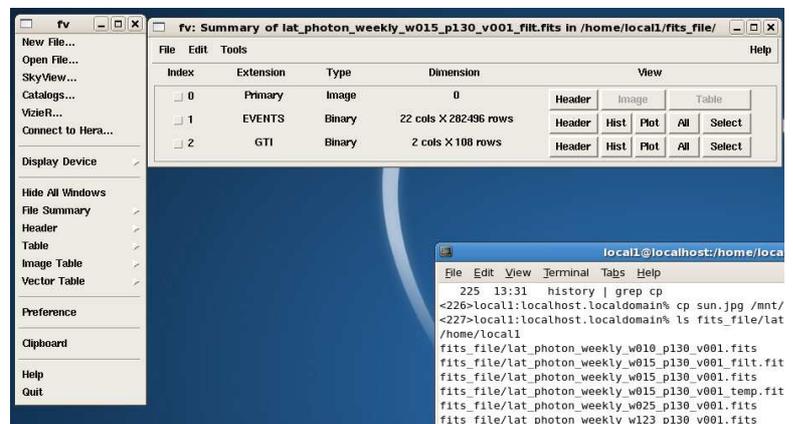


Figure 7 Menus de fv

Les données apparaissent sous forme d'une table, où chaque ligne correspond à un photon, et les différentes colonnes à ses paramètres, dont la description est donnée dans « Header »: Energy (énergie en MeV), RA (ascension droite), DEC (déclinaison), L (longitude galactique), B (latitude galactique), ..., TIME (temps de détection en MET),..., ainsi que d'autres paramètres annexes, nécessaires pour une analyse plus précise que celle présentée ici. Il est possible de créer des histogrammes de ces différents paramètres en cliquant sur Hist, puis sélectionner le paramètre désiré.

Les analyses simples présentées dans la suite font appel aux seuls paramètres Energy, RA, DEC (ou alternativement L et B) et TIME.

<sup>6</sup> [http://heasarc.gsfc.nasa.gov/ftools/fv/tutorial/fv\\_guide.html](http://heasarc.gsfc.nasa.gov/ftools/fv/tutorial/fv_guide.html)

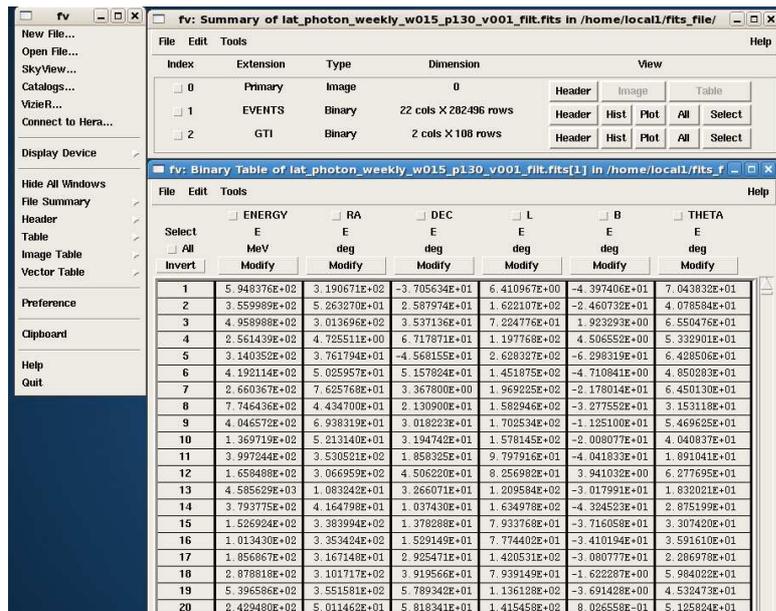


Figure 8 Menus et table « EVENTS » visualisée par fv

## Télécharger un fichier hebdomadaire pour une date donnée

Convertir la date en MET, ce qui donne également la semaine correspondante.

- Date\_to\_MET heure minute seconde jour mois année

Exemple

- Date\_to\_MET 0 0 0 16 9 2008

2008-09-16 00:00:00

MET: 243216000 semaine: 15

Le fichier de données est téléchargé (si la liaison internet fonctionne) grâce à la commande :

- fetch 15

Cette commande télécharge dans un premier temps le fichier lat\_photon\_weekly\_wxxx\_p130\_v001.fits sous le répertoire fits\_file et en élimine certains photons qui proviennent essentiellement du bruit de fond (condition « zenith\_angle>100 »). Le nouveau fichier s'appelle lat\_photon\_weekly\_wxxx\_p130\_v001\_filt.fits et est utilisé par la suite, alors que le fichier original lat\_photon\_weekly\_wxxx\_p130\_v001.fits est effacé pour économiser de l'espace sur le disque.

On peut récupérer les données de la semaine actuelle avec la commande :

- fetch current

## Réalisation d'une carte du ciel utilisant une semaine de données

La commande :

- create\_map #semaine (option)

crée une carte du ciel (enregistrée dans le fichier counts\_map\_#semaine\_option.fits) pour la semaine entière sélectionnée (notée '#semaine') pour une projection (notée 'option') parmi trois possibles: cel, gal et ait (voir ci-dessous).

Ces cartes peuvent être visualisées avec la commande ds9<sup>7</sup>

➤ ds9 -cmap b -scale log -zoom to fit counts\_map\_#semaine\_option.fits

### Option 'cel'

La carte (exemple ci-dessous) est en coordonnées célestes et en projection cartésienne. L'échelle de DEC (ordonnée) s'étend de  $-90^\circ$  à  $+90^\circ$ . L'échelle en RA (abscisse) décroît de  $180^\circ$  à  $0^\circ$  puis croît de  $0^\circ$  à  $180^\circ$ , de telle sorte que le point RA=0, DEC=0 (appelé point vernal, position apparente du Soleil à l'équinoxe de printemps) soit au centre de la figure. Le plan de la Galaxie forme une courbe en cloche. Cette projection ne conserve pas les superficies, les zones situées près des pôles étant très dilatées par rapport à celles proches de l'équateur. Ce type de cartes peut être utilisée pour trouver les coordonnées (RA,DEC) de sources brillantes en utilisant le curseur dans ds9.

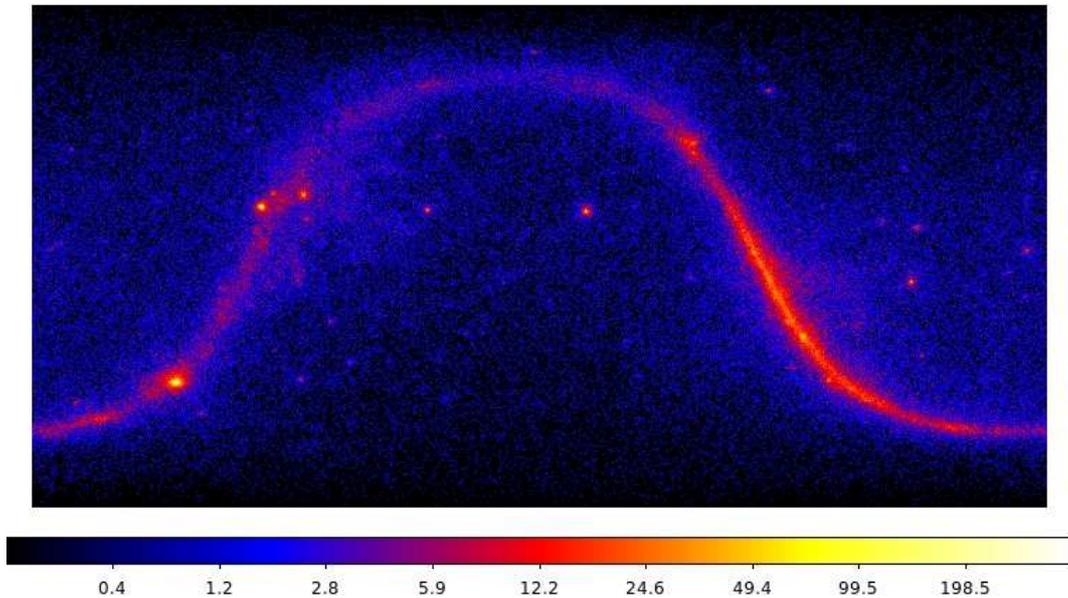


Figure 9 Carte en projection cartésienne et en coordonnées célestes.

### Option 'gal'

La carte (exemple ci-dessous) est en coordonnées galactiques et en projection cartésienne. L'échelle en B (ordonnée) s'étend de  $-90^\circ$  à  $+90^\circ$ . L'échelle en L (abscisse) décroît de  $180^\circ$  à  $0^\circ$  puis croît de  $0^\circ$  à  $180^\circ$ , de telle sorte que le point L=0, B=0 (le centre galactique) soit au centre de la figure. Le plan de la Galaxie s'étend le long de l'axe B=0. Cette projection ne conserve pas les superficies, les superficies près des pôles étant très dilatées par rapport à celles près de l'équateur. Ce type de cartes peut être utilisée pour trouver les coordonnées (L,B) de sources brillantes en utilisant le curseur dans ds9.

<sup>7</sup> <http://hea-www.harvard.edu/RD/ds9/ref/>

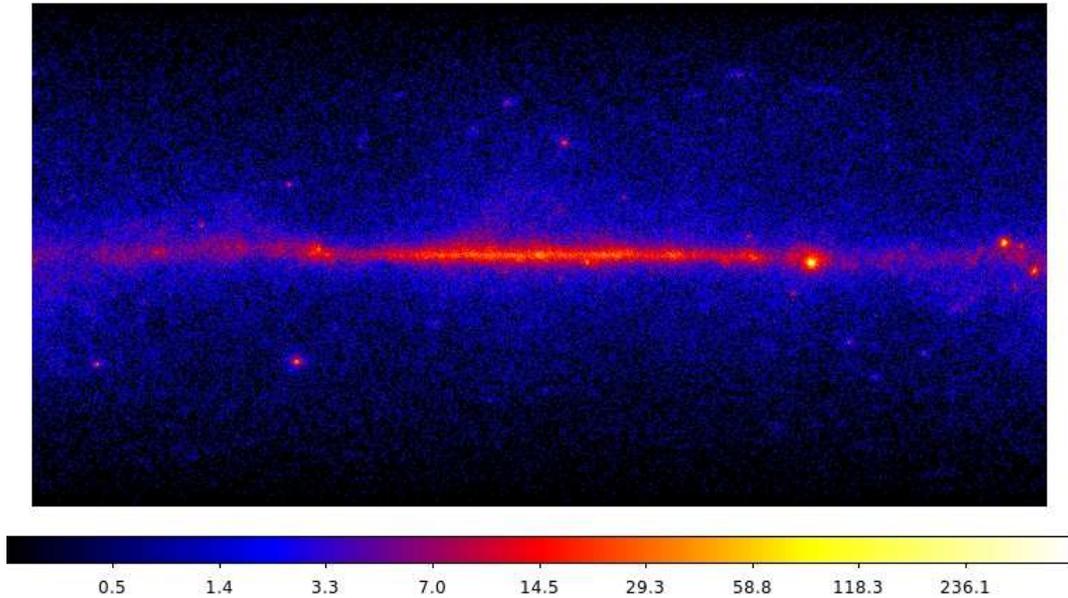


Figure 10 Carte en projection cartésienne et en coordonnées galactiques.

### Option 'ait'

La carte (exemple ci-dessous) est en coordonnées galactiques et en projection Hammer-Aitoff. Certaines courbes à L et B constants sont représentées. Cette projection conserve les superficies, d'où son utilisation très courante en astronomie.

La commande suivante a été utilisée :

- `ds9 -cmap b -scale log -zoom to fit -grid yes -grid view axes tickmarks no -grid skyformat degrees -grid format1 d.0 -grid format2 d.0 -wcs galactic -file counts_map_015_ait.fits -regions load all bright_sources.reg`

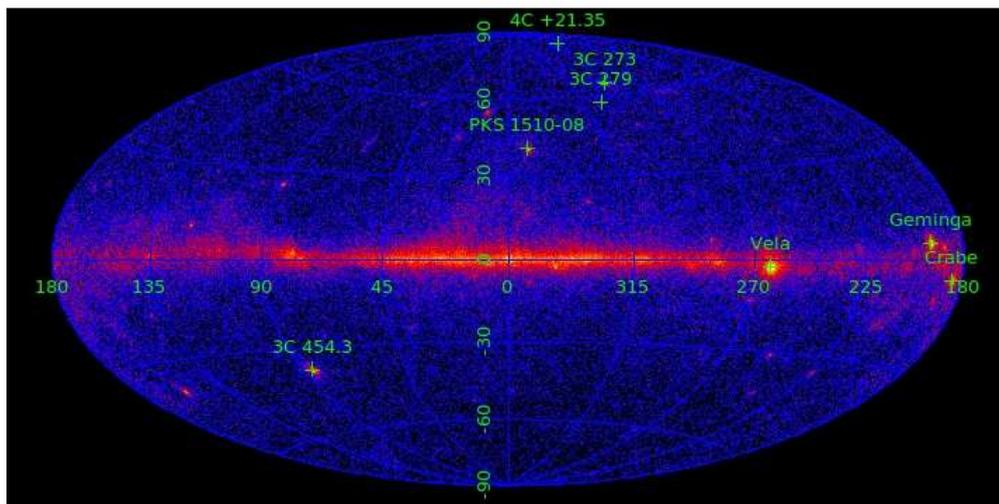


Figure 11 Carte en projection Hammer-Aitoff et en coordonnées galactiques. La position de sources brillantes a été ajoutée (3 pulsars, dans le plan galactique et 5 blazars, en dehors).

### Création d'une carte du ciel avec sélection

La commande :

- `create_map #semaine option time_min time_max ra dec r emin emax`

permet de créer une carte où les photons ont été sélectionnés :

- en temps d'arrivée, compris entre `time_min` et `time_max`, exprimés en MET (ces temps doivent être compris dans les limites de la semaine sélectionnée ; note : entrer `time_min=0` et `time_max=0` permet de sélectionner tous les photons du fichier).
- en position, dans une région du ciel circulaire centrée au point de coordonnées (RA, DEC) et de rayon `r`
- en énergie entre `emin` et `emax`, exprimés en MeV.

En plus du fichier `counts_map_#semaine.fits` visualisable avec ds9, un fichier des photons sélectionnés est créé sous le nom `lat_photon_weekly_w#semaine_p130_v001_temp.fits`

### Description de la carte du ciel

Les photons proviennent essentiellement de quatre composantes :

- le **fond diffus d'émission galactique**, principalement dû à l'interaction des rayons cosmiques avec la matière de la galaxie (gaz, poussière); il contribue à rendre le plan de la Galaxie si visible ;
- le **fond diffus isotrope** (c'est-à-dire spatialement uniforme) dont l'origine est incertaine; Il est peut-être constitué de différentes composantes, certaines connues (noyaux actifs de galaxie non résolus), d'autres plus hypothétiques (autres types de galaxie, matière noire).
- un **bruit de fond instrumental** résiduel, correspondant à des particules différentes des rayons gamma cosmiques, qui sont mal identifiées et passent « à travers les mailles » des outils de rejection. Ce bruit de fond est plus ou moins uniforme comme le précédent. Pour la plupart des applications pratiques ils sont considérés comme une composante unique et non séparément ;
- des **sources ponctuelles**, soit galactiques: pulsars, nébuleuses de pulsars et autres restes de supernova, binaires X, amas globulaires, soit extragalactiques : noyaux actifs de galaxie et sursauts gamma. Le catalogue le plus récent, publié en 2012 et établi avec 2 ans de données compte 1873 sources. Les trois sources les plus brillantes, qui ont une luminosité constante (ou quasi-constante) sont des pulsars: les pulsars de Vela, Geminga et du Crabe. Ils produisent une émission pulsée avec des périodes de 89 ms, 237 ms et 33 ms respectivement, avec très peu de photons au-delà de 10 GeV (10000 MeV), comme le montre la carte ci-dessous réalisée avec des photons au-delà de ce seuil.

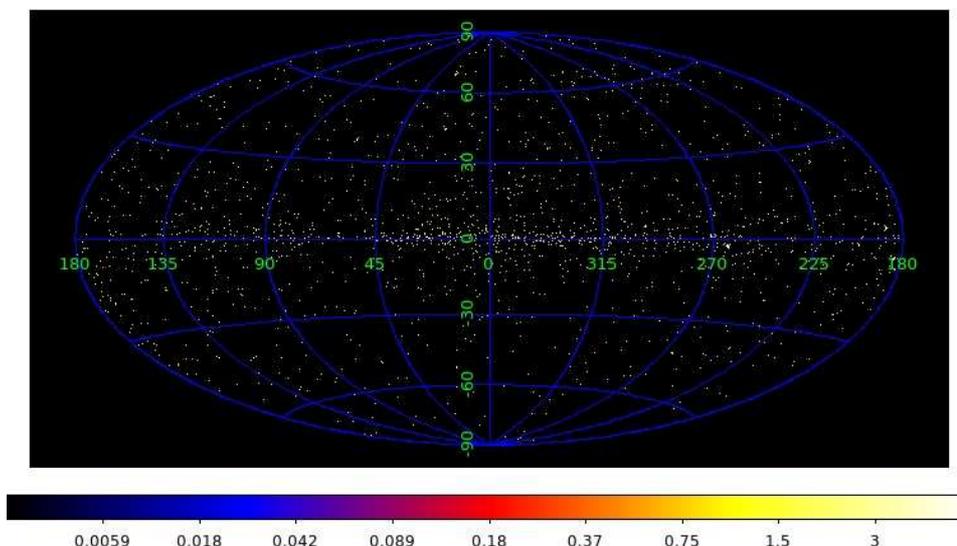
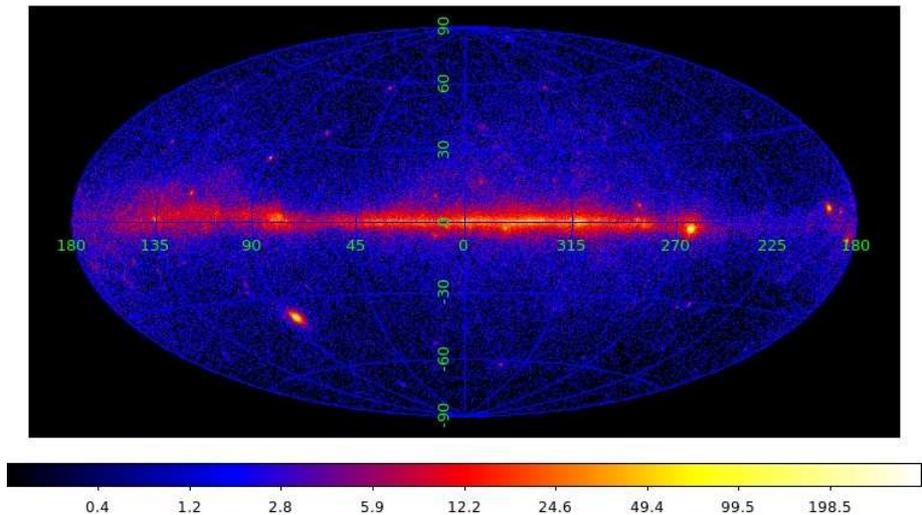


Figure 12 Carte en projection Hammer-Aitoff et en coordonnées galactiques, pour des photons d'énergie supérieure à 10 GeV.

### Eruption majeure de 3C 454.3

3C 454.3 est le plus brillant du millier de blazars détectés par le LAT. Les blazars sont des radiogalaxies (appartenant à la classe des galaxies actives) qui présentent un jet relativiste, émanant des régions proches d'un trou noir supermassif central (qui a une masse supérieure à 100 millions de masses solaires) et qui est dirigé vers la Terre. Cette caractéristique rend la source très lumineuse et très variable, l'émission étant produite dans un cône étroit de quelques degrés d'ouverture. Situé à 7.2 milliards d'années lumière, 3C 454.3 a montré plusieurs éruptions majeures depuis la mise en service de Fermi en Août 2008, dont la plus spectaculaire a eu lieu entre le 17 et 22 Novembre 2010 (semaine 128). La source, de coordonnées galactiques  $L=86.1$ ,  $B=-38.2$ , était la plus brillante du ciel dans cette période.

Figure 13 Carte obtenue avec le fichier de la semaine 128. 3C 454.3 est apparent à  $(L,B)=(86.1, 38.2)$



La variation de luminosité de ce blazar est spectaculaire comme l'illustre la figure ci-dessous (couvrant d'Aout 2008 à Décembre 2010). Le flux Vela, la source habituellement la plus brillante du ciel est représenté par la ligne en pointillé. Chaque fois que le flux de 3C 454.3 dépasse cette valeur, elle devient la star du ciel en rayons gamma.

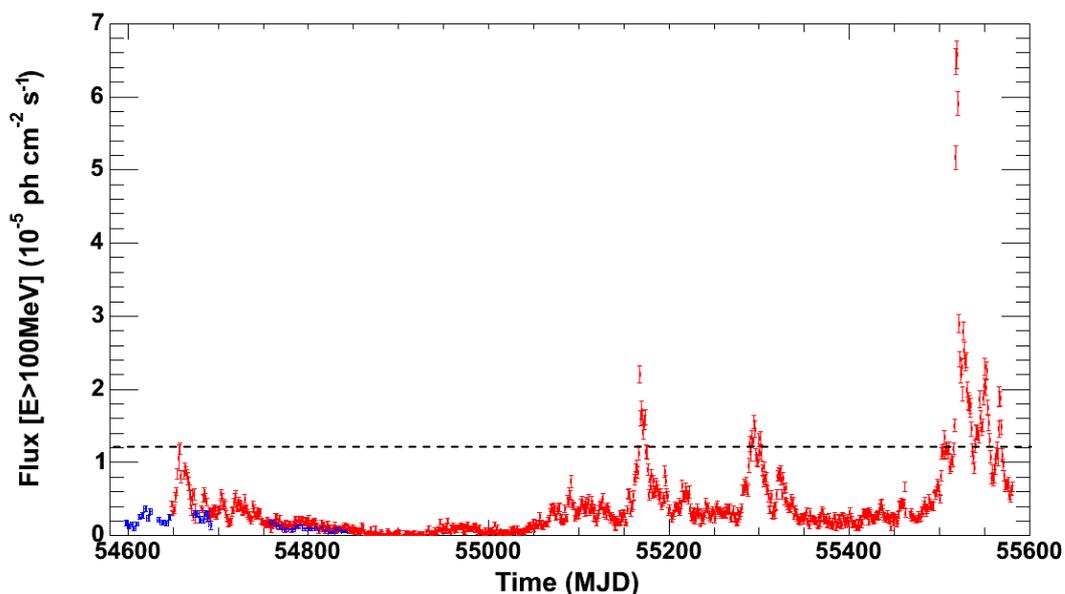


Figure 14 Evolution temporelle du flux ("courbe de lumière") du blazar 3C 454.3

## Un sursaut gamma très brillant

Le sursaut gamma GRB 080916C, correspondant probablement à l'explosion d'une étoile très massive en fin de vie, a été détecté le 16 Septembre 2008 à 0H13 UT et a duré 23 minutes. La distance estimée de l'explosion est de 12.2 milliards d'années lumière. Sa luminosité exceptionnelle correspondait à celle de 9000 supernovae.

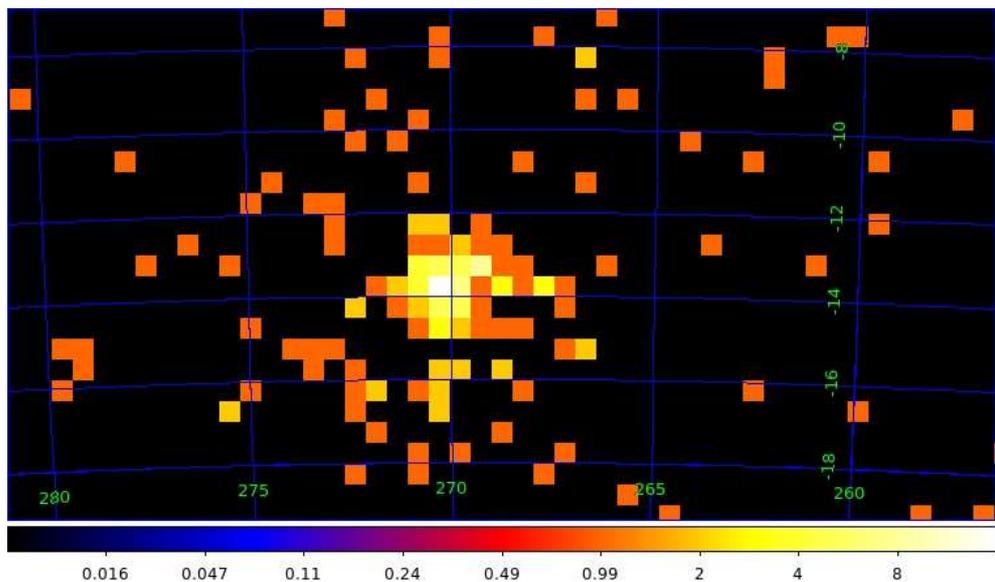
[http://www.nasa.gov/mission\\_pages/GLAST/news/high\\_grb.html](http://www.nasa.gov/mission_pages/GLAST/news/high_grb.html)

[http://en.wikipedia.org/wiki/GRB\\_080916C](http://en.wikipedia.org/wiki/GRB_080916C)

[http://www.science20.com/news\\_releases/grb\\_080916c\\_most\\_extreme\\_gammaray\\_blast\\_ever\\_we\\_know\\_about](http://www.science20.com/news_releases/grb_080916c_most_extreme_gammaray_blast_ever_we_know_about)

La carte suivante (créée avec `> create_map 15 ait 243216000 243219600 120 -56 15`) illustre la détection de cet événement.

Figure 15 Carte de la région de GRB090916C



On peut explorer l'évolution temporelle de cet événement rare :

➤ `fv fits_file/lat_photon_weekly_w015_p130_v001_temp.fits`

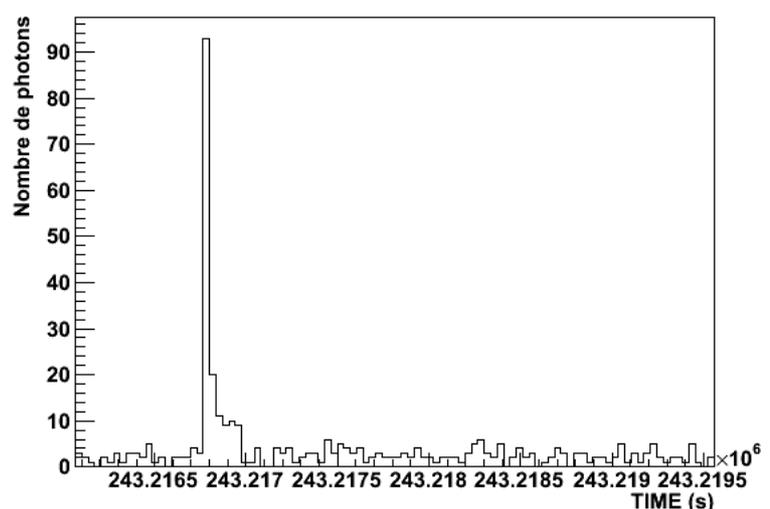
puis cliquer sur Hist, paramètre X: TIME, limites Min=243216000 Max=243219600 Bin Size=50

ou bien

➤ `hist #file_name TIME (#nombre_de_canaux)`

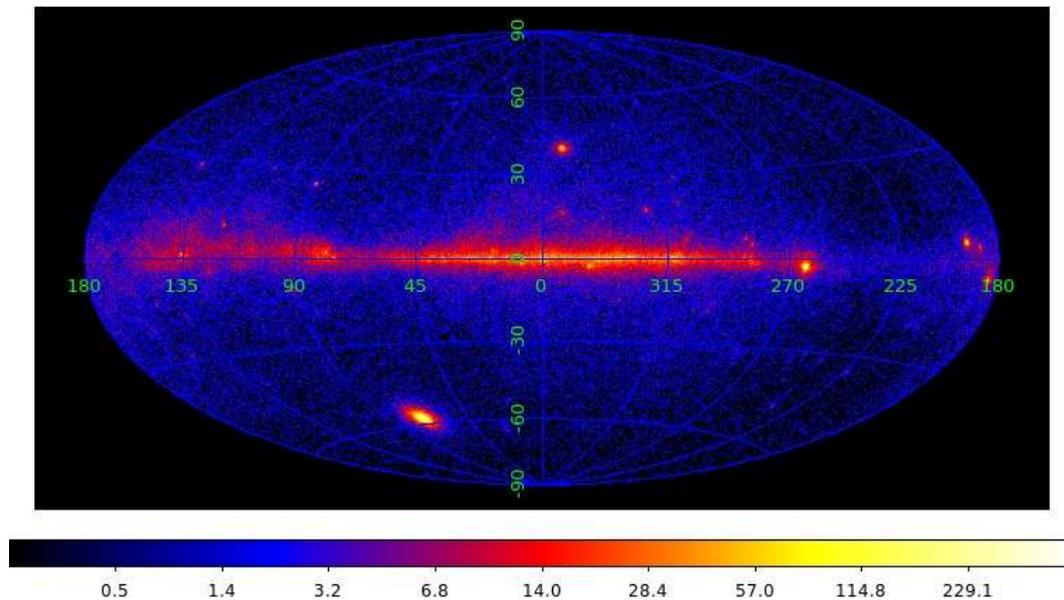
où #nombre\_de\_canaux est un paramètre optionnel (défaut: 100) et définit la taille de l'histogramme.

Figure 16 Distribution du temps d'arrivée des photons pendant l'heure où a eu lieu GRB090916C



## Une éruption solaire majeure

Cette éruption, la plus violente jamais observée avec des rayons gamma, a eu lieu le 6 Mars 2012 (semaine 196). La carte ci-dessous montre comme le soleil est visible ( $L \sim 80^\circ, B \sim -60^\circ$ ) pendant cette période.



### Utilisation du « blog de Fermi »

Pour (presque) chaque semaine, il est possible de consulter quelles sources variables ont été particulièrement actives grâce au « blog de Fermi ». Ce blog est un service offert à la communauté scientifique et est actualisé par des membres de la collaboration appelés « les défenseurs des éruptions » (« Flare advocates »). Pour une semaine donnée, taper :

➤ `blog #semaine`

pour visualiser le blog de la semaine concernée (en anglais...) via Firefox. Un exemple est donnée ci-dessous pour la semaine 196.

FERMI GAMMA-RAY SKY

TUESDAY, MARCH 13, 2012

**Fermi LAT weekly report N. 196**

Covered period: 2012 March 5-11 LAT Mission week: 196.57 - 197.57

- Significant gamma ray emission detected by the LAT from relevant **Solar Flares** occurred on March 5, March 7 and March 9.
- **PKS 1510-08** subject to an enduring high gamma-ray brightness state all week (weekly average flux about  $3.7E-6$ ).
- **S5 0716+71, PKS 1424-41, Mkn 421** are detected most days of the week (below daily level of  $1E-6$ ).
- **PKS 0454-234, B3 1343+451, Ton 599, B2 1520+31, BL Lac, Mkn 501, PKS 2255-282, S5 1803+78** are the other blazars detected in one or some days of the week.
- **Crab** source actively rumbling during the week, exceeding the daily flux level of  $4E-6$  in the midst of the week.

LAT DATA

- LAT First Catalog
- LAT Monitored Source List Light Curves
- LAT Bright Source List
- Browse interface to monitored source data
- Contact Information by Individual Sources

BLOG ARCHIVE

- ▶ 2013 (1)
- ▼ 2012 (51)
  - ▶ December (4)
  - ▶ November (5)
  - ▶ October (5)
  - ▶ September (3)
  - ▶ August (5)
  - ▶ July (4)
  - ▶ June (5)
  - ▶ May (4)
  - ▶ April (4)
  - ▼ March (4)

Fermi LAT weekly report N. 196

“

## Au-delà de la création de cartes, pour ceux qui en veulent plus...

Les cartes présentées ci-dessus mettent en oeuvre le simple comptage de photons. Les grandeurs physiques caractérisant une source que l'on cherche à déterminer sont le flux de photons (unité: photons/cm<sup>2</sup>/s), le flux d'énergie (unité: erg/cm<sup>2</sup>/s), et la distribution en énergie (appelée spectre) des photons issus de la source. Le spectre en rayons gamma est utilisé conjointement avec les spectres obtenus dans d'autres domaines du spectre électromagnétiques (radio, micro-onde, infrarouge, visible, ultraviolet, rayons X, rayons gamma de basse ou de très haute énergie) pour être comparé aux prédictions de modèles et ainsi établir quels sont les processus d'émission, les propriétés des particules émettrices et celles de l'environnement (incluant la matière, les rayonnements, le champ magnétique...) du site d'émission.

De manière très simplifiée, le nombre de photons collectés  $N$  est égal à :  $N = F \times S \times T$  où  $F$  est le flux de la source,  $S$  l'aire de collection (appelée surface effective) et  $T$  le temps de collection. Dans le cas du Fermi-LAT,  $S$  dépend de l'énergie et n'est pas constante en fonction du temps, puisque l'instrument balaye le ciel continuellement :  $S$  varie fortement avec l'angle  $\theta$  entre l'axe de l'instrument et la direction de la source dans le ciel. On appelle exposition,  $A$ , le produit  $S \times T$  (plus exactement  $A = \int S(\theta(t)) dt$ , où l'angle  $\theta(t)$  varie avec le temps. C'est la même notion qui apparaît en photographie, l'exposition d'une photo dépendant du diaphragme, qui est proportionnel au rayon de l'ouverture dans laquelle passe la lumière, et le temps de pose.

Le nombre différentiel de photons par unité d'énergie est :  $N(E) = F(E) \times A(E)$  et le nombre total de photons attendu devient:  $N = \int F(E) A(E) dE$ . Dans l'analyse standard du Fermi-LAT, on définit une région du ciel centrée sur la source avec un rayon typique de 10 degrés, et on ajuste les paramètres d'un modèle qui prend en compte toutes les sources et composantes diffuses contribuant aux photons de cette région. Cette analyse tient compte de l'étalement de la direction des photons dû à l'imperfection de l'instrument (« résolution angulaire », qui dépend fortement l'énergie), qui conduit au recouvrement de différentes sources voisines. Pour l'analyse de sources très brillantes, il est possible de faire une analyse simplifiée. Elle permet de trouver le coefficient  $K$  et l'indice spectral  $\Gamma$ , en supposant que la distribution de flux différentiel est une loi de puissance  $F(E) = KE^{-\Gamma}$  à partir de la distribution en énergie des photons sélectionnés sur une région centrée sur la direction de la source et incluant 90% des photons de la source (en prenant en compte la résolution angulaire)<sup>8</sup>. La figure ci-dessous présente la distribution d'énergie des photons ainsi sélectionnés. La courbe rouge représente le résultat d'un modèle où la fonction en loi de puissance  $F(E)$  (représentée ci-dessous en bleu) est multipliée par la fonction d'exposition  $A(E)$  (représentée en vert), puis intégrée sur le même pas en énergie que l'histogramme des photons, afin de disposer de quantités comparables. La contribution du bruit de fond diffus est souvent négligeable pour une source brillante.

La commande `fit_spectrum` permet de chercher manuellement un couple  $(F, \Gamma)$  qui reproduit correctement les données par une comparaison telle que celle de la figure ci-dessous. Elle

---

<sup>8</sup> La détermination du flux intégral  $F$  au dessus d'une énergie donnée  $E_0$  est souvent préférée à celle  $K$  car ayant plus d'intérêt physique et s'en déduit simplement,

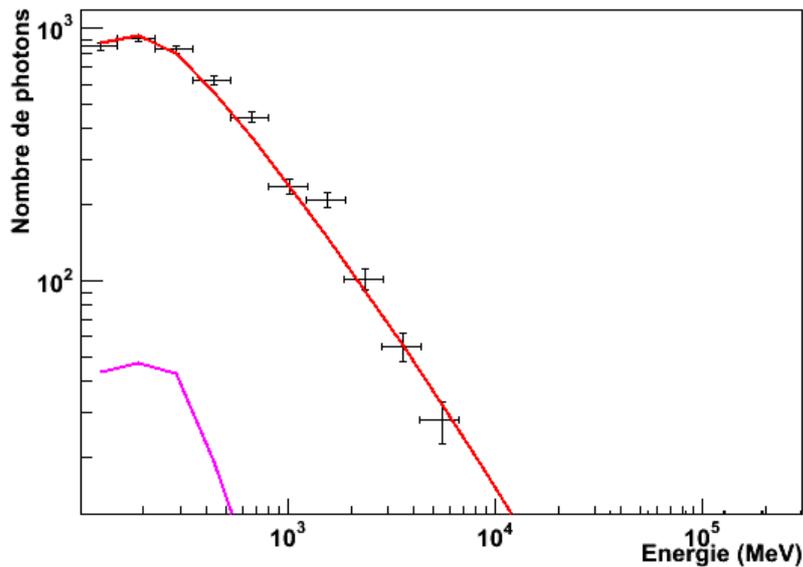
$$F = \int_{E_0}^{+\infty} F(E) dE = KE_0^{-\Gamma+1} / (\Gamma - 1).$$

nécessite un fichier de données créé par create\_map pour une région centrée sur la source de rayon  $\sim 10$  deg et un fichier des données du satellite téléchargé avec fetch\_sat pour la semaine considérée.

➤ fit\_spectrum #semaine

Enter flux, index (type -1 to exit) :  $1.7e-5$ , 2.3

Dans l'exemple ci dessus, #semaine=128, on a entré  $F=1.7 \times 10^{-5}$  photons  $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$  (flux intégral au dessus de 100 MeV) et un indice spectral  $\Gamma$  de 2.3.  $F$  est typiquement de l'ordre de  $10^{-6}$  -  $10^{-5}$  ph  $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$  pour une source brillante, et  $\Gamma$  est compris entre 1.5 et 3. Dans le jargon scientifique, un spectre avec  $\Gamma$  faible ( $< 2$ ) est appelé « dur », avec  $\Gamma$  grand, il est dit « mou ».



**Figure 18** Distribution en énergie des photons sélectionnés dans une région autour de 3C 454.3. (croix noires). La courbe rouge représente un modèle dont les paramètres ont été ajustés manuellement pour reproduire correctement les données. La courbe magenta correspond à la contribution du fond diffus.

Figure 19 Panneau du haut: Distribution en loi de puissance du modèle utilisé. Panneau du bas: Courbe d'exposition en fonction de l'énergie des photons pour 3C 454.3 dans la semaine 196.

