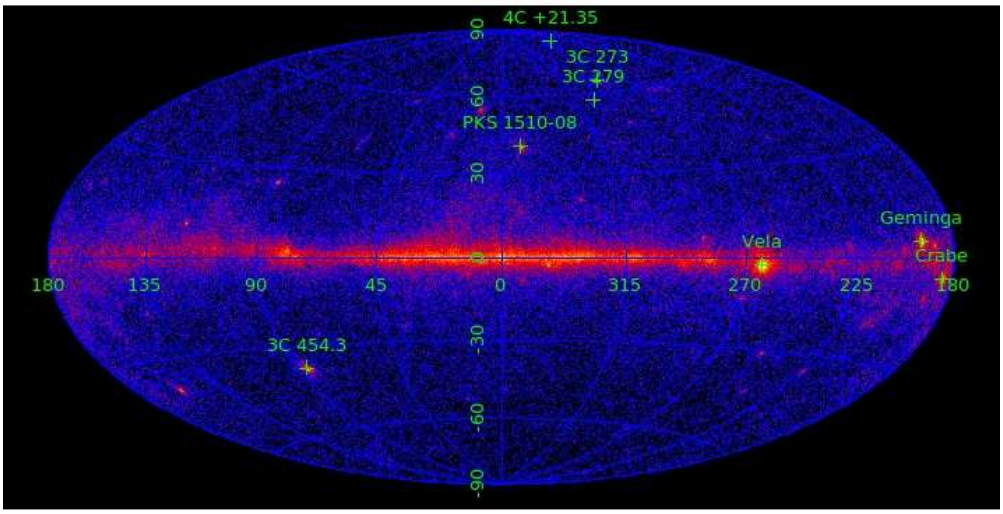
“Le ciel en rayons gamma visible par tous”
Le projet COSMAX

Version v2
Janvier 2014

Benoit Lott, lott@cenbg.in2p3.fr
Denis Dumora, dumora@cenbg.in2p3.fr

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



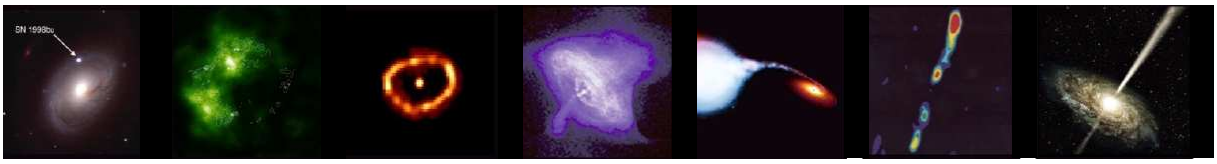
Introduction

Le projet Cosmax est basé 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 le grand public 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 privilégiée 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). Des films illustrant l'évolution temporelle de ces événements peuvent être créées. 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

Les dernières nouvelles peuvent être consultées sur :
ftp://www.cenbg.in2p3.fr/astropart/VM/news.txt



Tutoriel de l'exploration des données du LAT

Contexte

- Le satellite Fermi orbite la Terre à une latitude 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 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° à haute énergie (au-delà de 10 GeV) et environ 5° 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/[1] 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/[2].
- Le temps de détection des photons est exprimé en «mission elapsed time » (MET), temps par rapport à un temps de référence fixé arbitrairement au 1er Janvier 2001[3].
- 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).

[1] Un programme utilitaire, « fetch », installé sur la machine VMware permet de réaliser ce téléchargement automatiquement pour une semaine donnée.
[2] L'utilitaire « fetch_sat » permet de réaliser ce téléchargement automatiquement pour une semaine donnée.
[3] Les utilitaires Date_to_MET and MET_to_Date permettent de convertir la date et l'heure (en temps universel) en MET et inversement.

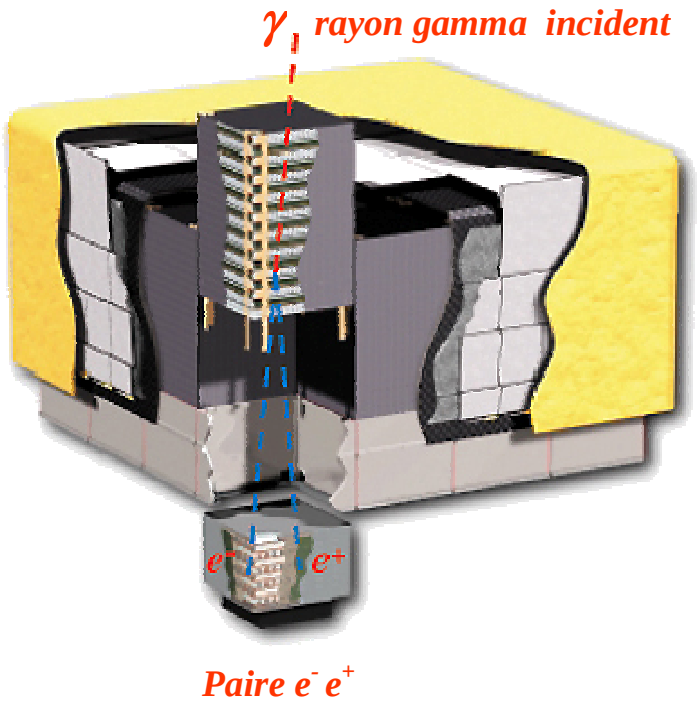


Figure 1 Schéma éclaté du Fermi-LAT. Le télescpe est constitué de 16 éléments, composés chacun d'un trajectographe (partie supérieure) et d'un calorimètre (partie inférieure). Un système d'anticoincidence (tuiles en gris clair) entoure la partie supérieure et est recouverte d'un bouclier de protection contre les micro-météorites (en jaune).

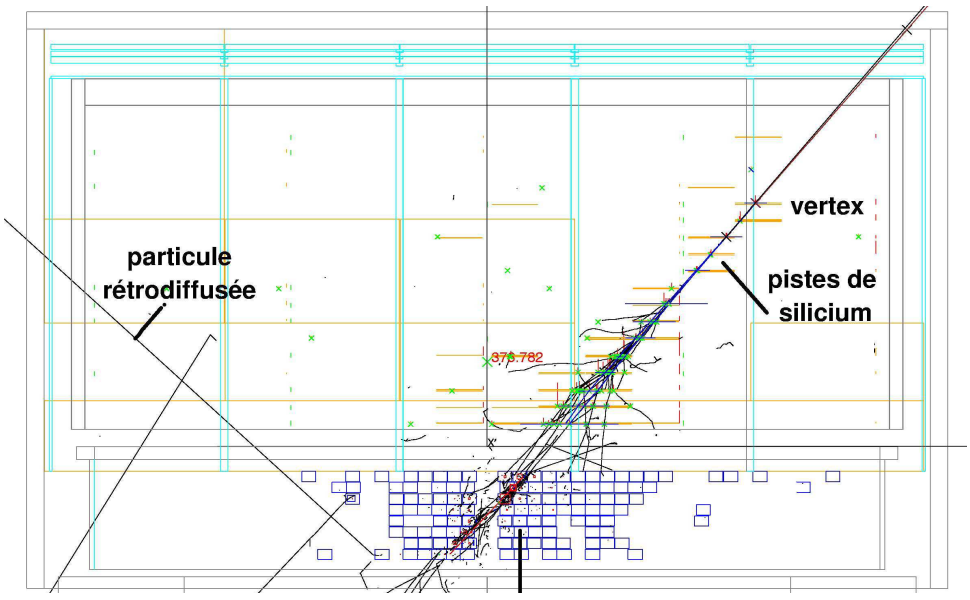


Figure 2 Résultat de la simulation d'un photon de 5 GeV détecté par le LAT.

Installation de la machine virtuelle (utilisateurs Windows)

Configuration requise
- Windows XP ou version plus récente avec une connection internet.[4]
- 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 ?» apparait, 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 répertoire apparait sous "Host Path". Cliquer sous OK (voir figure ci-dessous).
- Dans votre session, le repertoire d'échange se trouve sous /mnt/hgfs/Echange

---

[4] - 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.

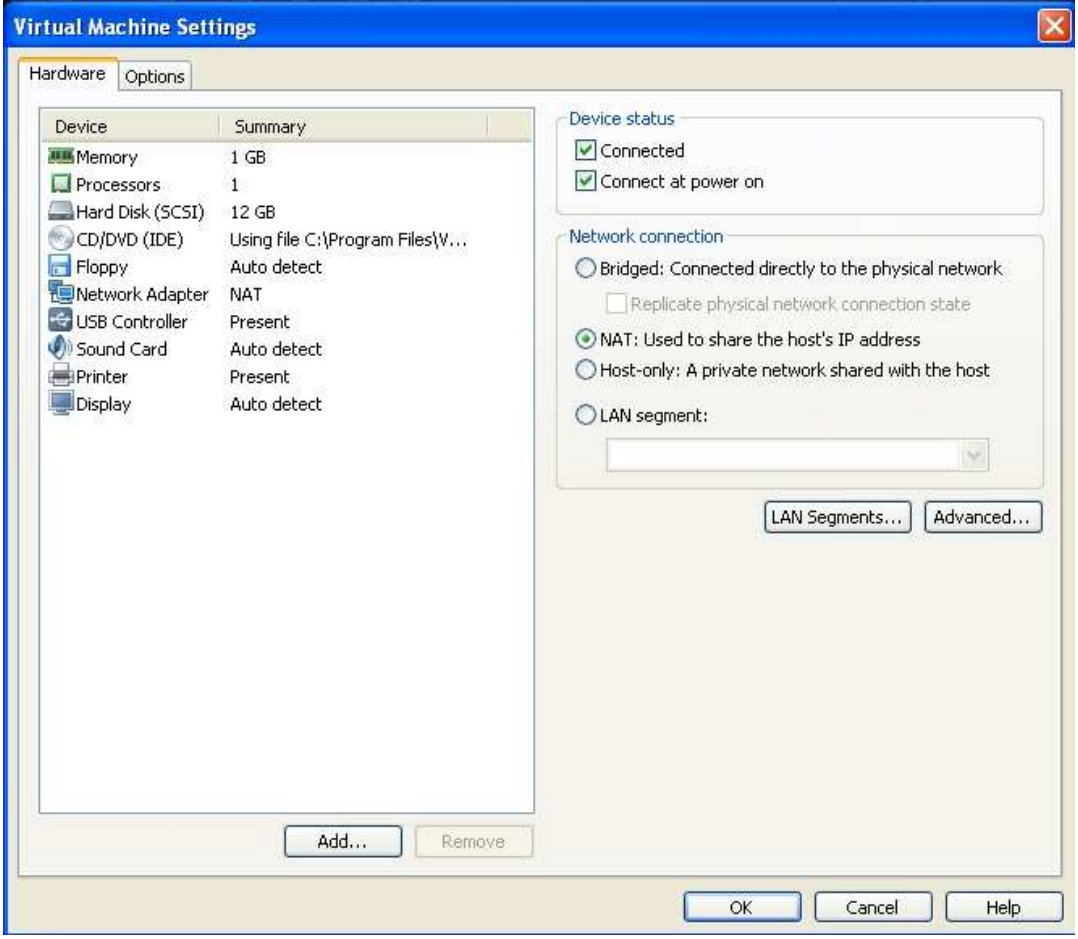


Figure 3. Page "Hardware" de la configuration de la machine virtuelle (Vrtual Machine Settings) .

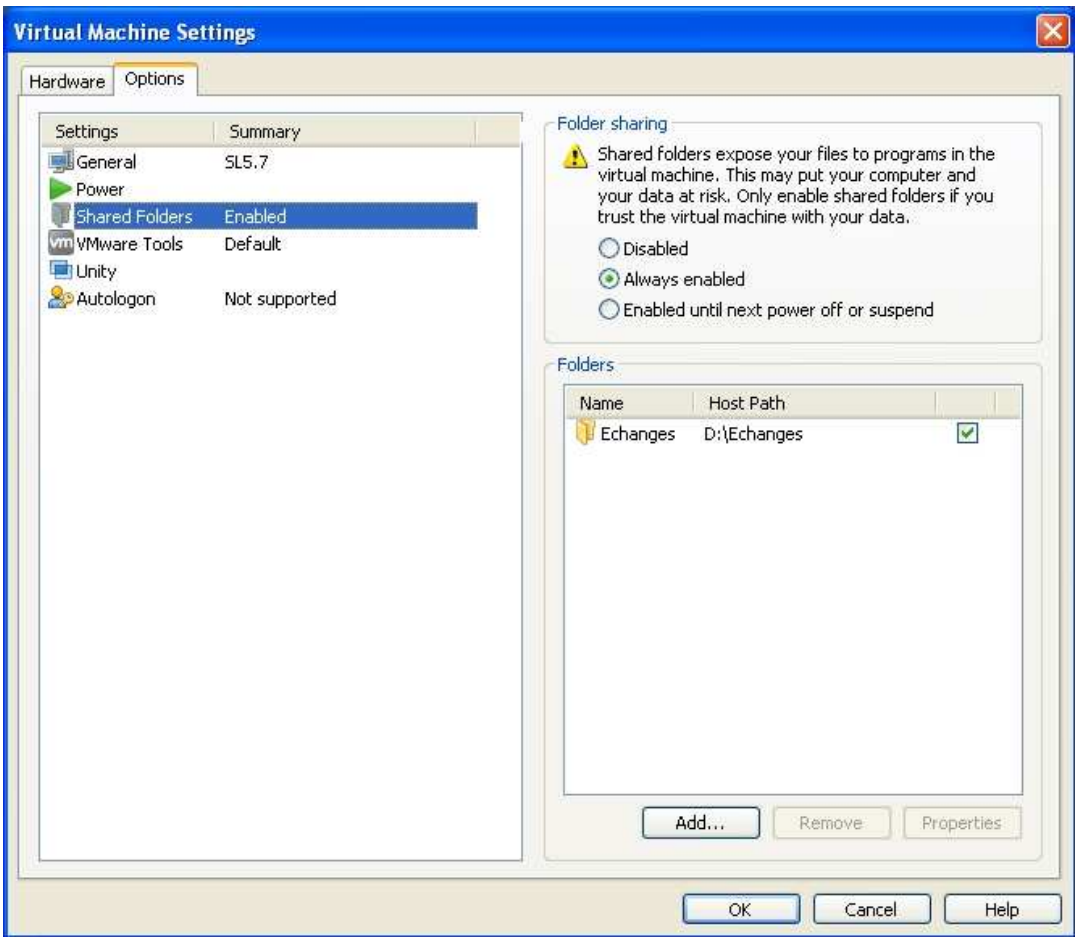


Figure 4. Page "Options" de la configuration de la machine virtuelle (Virtual Machine Settings)

Installation des outils sous Linux (utilisateurs Linux)

Les utilisateurs voulant travailler sous leur environnement Linux peuvent installer directement les outils sans passer par la machine virtuelle. La description de l'installation est donnée dans le fichier ftp://www.cenbg.in2p3.fr/astropart/VM/README.txt, reproduit ci-dessous.

- créer un répertoire d'accueil (appelé par exemple /xxxx/cosmax)
- télécharger le fichier ftp://www.cenbg.in2p3.fr/astropart/VM/cosmax_linux.tar.gz dans ce répertoire
- décompresser le fichier: tar -xfz cosmax_linux.tar.gz
- assigner la variable d'environnement COSMAX au chemin du répertoire d'accueil: si le shell est csh
  - setenv COSMAX /xxxx/cosmax
  - source setup.csh
- si le shell est sh
  - export COSMAX=/xxxx/cosmax
  - source setup.sh
- tester si python et root sont installés:
  - which python
  - which root
- Si les deux commandes précédentes donnent des résulats positifs, le programme est prêt.

Préambule

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.

Données

Les fichiers hebdomadaires 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. Du fait de leur taille, seuls quelques fichiers sont préinstalles. Les autres fichiers peuvent être téléchargés individuellement (voir section suivante).

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 #semaine

Ex : fetch 15
Cette commande télécharge dans un premier temps le fichier lat_photon_weekly_wxxx_p130_v001.fits 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.
Note : Les fichiers de données sont stockés par défaut sous le répertoire fits_file. Un autre répertoire de destination peut être choisi grâce à la variable d'environnement DATAFILE_DIR.

- setenv DATAFILE_DIR #repertoire_de_destination

Les données de plusieurs semaines consécutives peuvent téléchargées grâce à :

- fetch #semaine_initiale-#semaine_finale

Ex : fetch 120-122
On peut récupérer les données de la semaine actuelle avec la commande :

- fetch current

Les données du satellite (uniquement nécessaires dans l'utilisation des commandes create_exposure, create_light_curve et create_spectrum ci-dessous) peuvent être téléchargées par :

- fetch_sat #semaine

ou

- fetch_sat #semaine_initiale-#semaine_finale

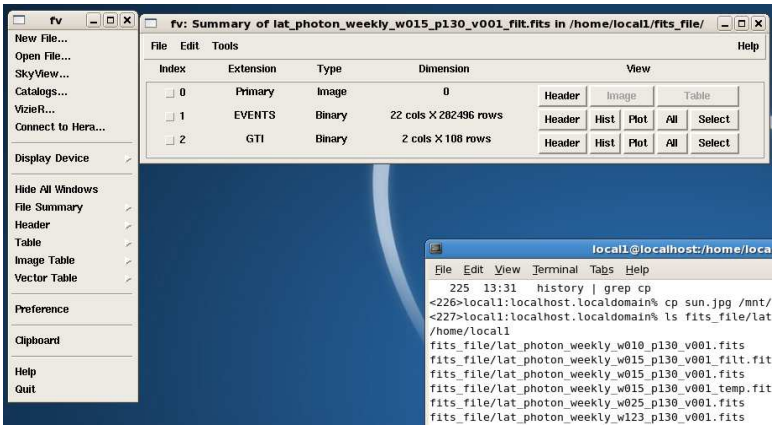
Note : Les fichiers de données du satellite sont stockés par défaut sous le répertoire fits_file_sat. Un autre répertoire de destination peut être choisi grâce à la variable d'environnement SATFILE_DIR.

- setenv SATFILE_DIR #repertoire_de_destination

Exploration des données

Ouvrir un des fichiers de données hebdomadaires (ici pour la semaine 15) avec le programme fv[5] (« fits viewer ») :

- fv fits_file/lat_photon_weekly_w015_p130_v001_filt.fits



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

Figure 5 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.

[5] http://heasarc.gsfc.nasa.gov/ftools/fv/tutorial/fv_guide.html

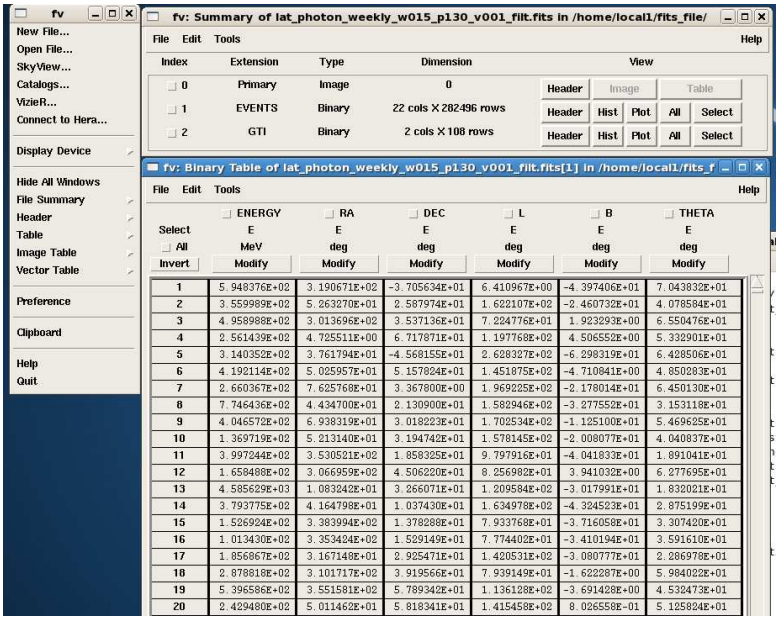


Figure 6 Menus et table « EVENTS » visualisée par fv

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[6]

- 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° à +90°. L'échelle en RA (abscisse) décroit de 180° à -180°, 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.

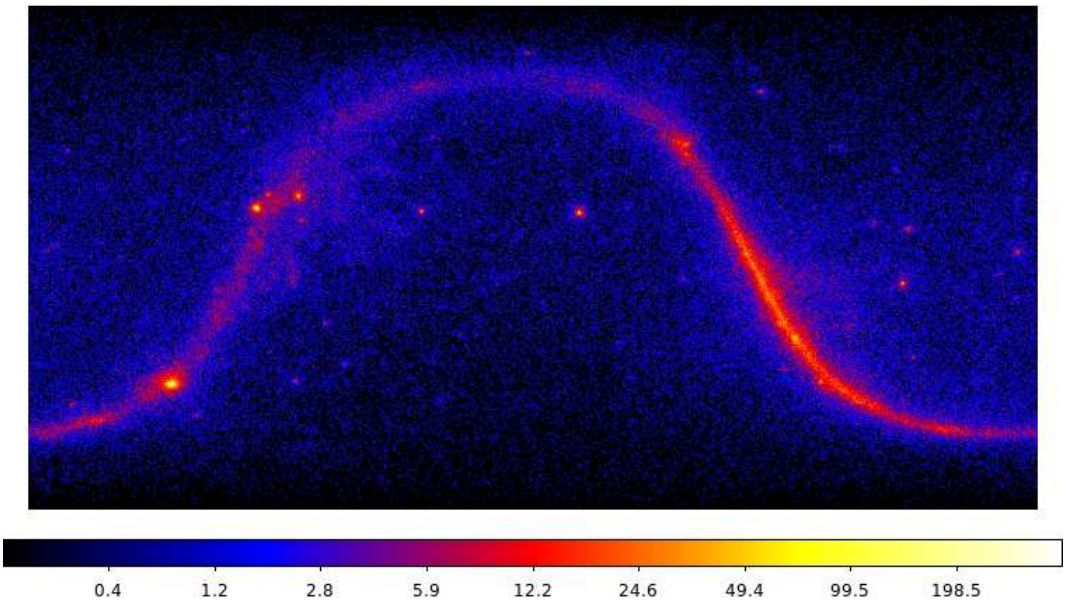


Figure 7 Carte en projection cartésienne et en coordonnées celestes.

Option 'gal'

La carte (exemple ci-dessous) est en coordonnées galactiques et en projection cartésienne. L'échelle en B (ordonnée) s'étend de -90° à +90°. L'échelle en L (abscisse) décroit de 180° à -180°, 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 surperficies 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.

[6] http://hea-www.harvard.edu/RD/ds9/ref/

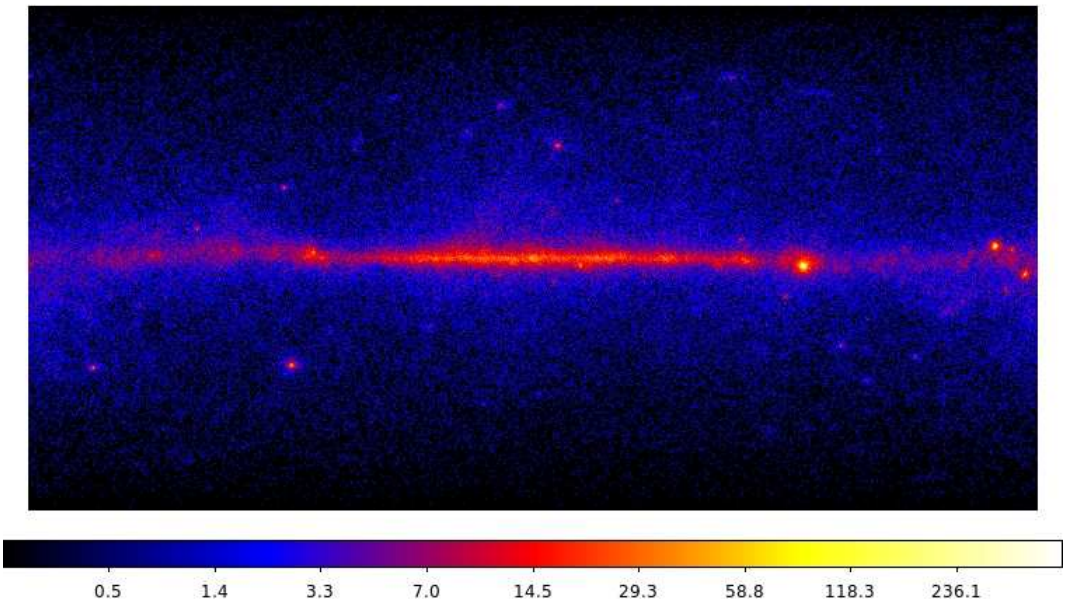


Figure 8 Carte en projection cartésienne et en coordonnées galactiques.

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

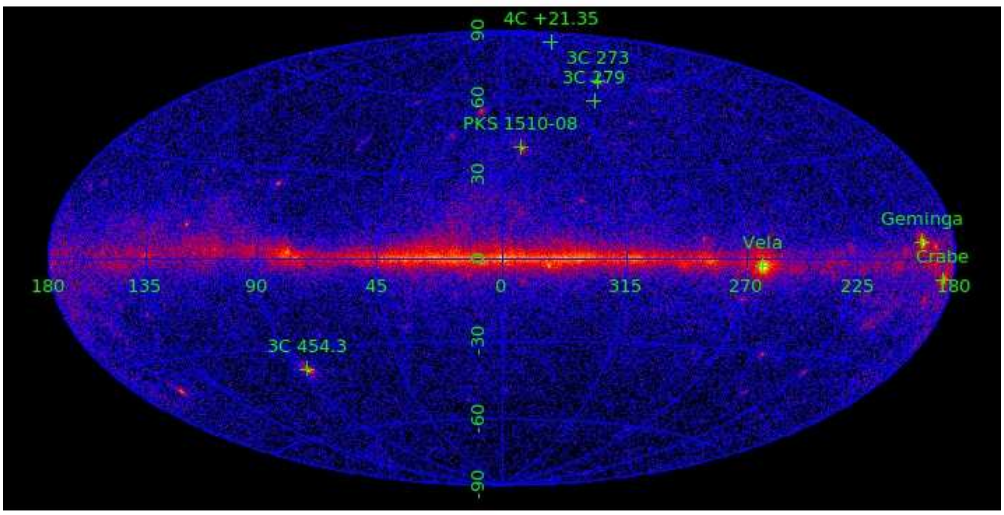


Figure 9 Carte en projection Hammer-Aitoff et en coordonnées galactiques. La position de sources brillantes a été ajoutée (3 pulsars, dans le plan galactique et 5 blazars, en dehors).

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

Création d'un film d'animation illustrant l'évolution temporelle d'une source

La commande :

- create_movie #semaine option time_min time_max delta_t (ra dec r emin emax delai)

permet de créer une animation

- où le temps d'arrivée des photons est 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) et delta_t est la période couverte par chaque image (en seconde). Le paramètre delai est le temps entre deux images dans l'animation (défaut : 0.05 s).

Note : Plusieurs semaines consécutives peuvent être combinées en remplaçant #semaine par #semaine_initiale-#semaine_finale.

Des sélections optionnelles peuvent être réalisées :

- 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.

Le fichier résultant, en format « gif animé», est stocké sous movie/mov_#semaine.gif (ou movie/mov_#semaine_initiale-#semaine_finale.gif). Il peut être visualisé par exemple avec firefox :

> firefox movie/mov_#semaine.gif

Des exemples sont donnés ci-dessous pour le sursaut gamma et l'éruption solaire.

Création d'une courbe de lumière illustrant l'évolution temporelle d'une source

La commande :

- create_light_curve #semaine fichier_de_sortie time_min time_max delta_t (ra dec r emin emax)

permet de créer une courbe de lumière (variation du flux d'une source en fonction du temps)

- où le temps d'arrivée des photons est 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) et delta_t est la période couverte par chaque image (en seconde).

Note : Plusieurs semaines consécutives peuvent être combinées en remplaçant #semaine par #semaine_initiale-#semaine_finale.

Important : les fichiers du satellite pour toutes les semaines doivent aussi être disponibles (obtenu par fetch_sat #semaine), afin de calculer l'exposition et d'accéder au flux à partir du nombre de photons.

Des sélections optionnelles peuvent être réalisées :

- 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.

Le fichier résultant (fichier_de_sortie) est en format texte :
temps, delta_t,flux, erreur sur le flux

Description de la carte du ciel

Les photons proviennent essentiellement de quatre composantes :

- le **fond diffus d'émission galactique**, principalement dû à l'intéraction 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.

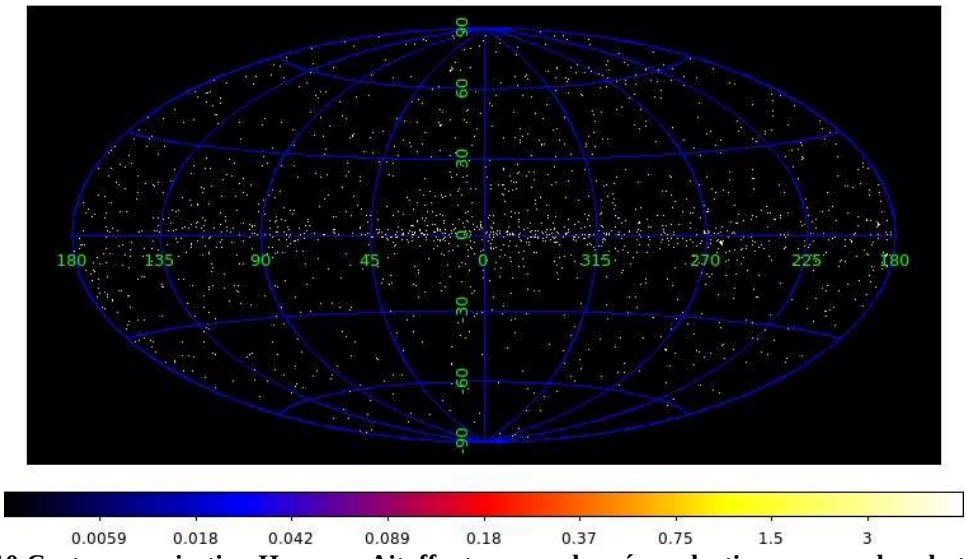
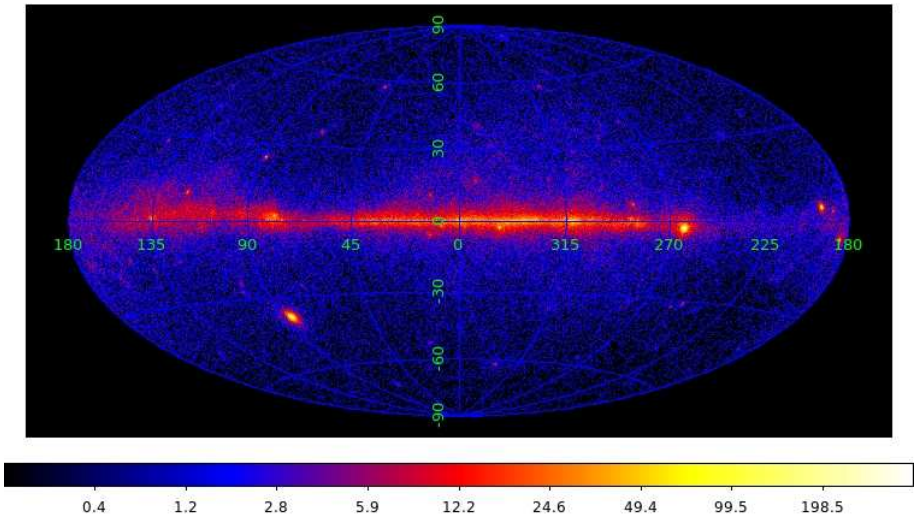


Figure 10 Carte en projection Hammer-Aitoff et en coordonnées galactiques, pour des photons d'énergie supérieure à 10 GeV.

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 milions 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 11 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.

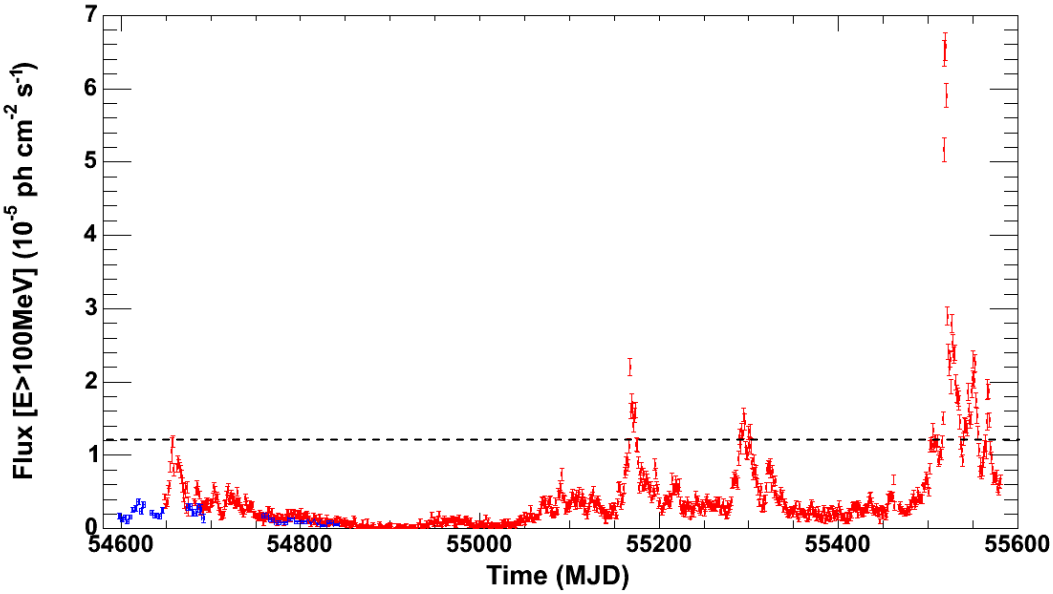


Figure 12 Evolution temporelle du flux ("courbe de lumière") du blazar 3C 454.3

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://en.wikipedia.org/wiki/GRB_080916C
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.

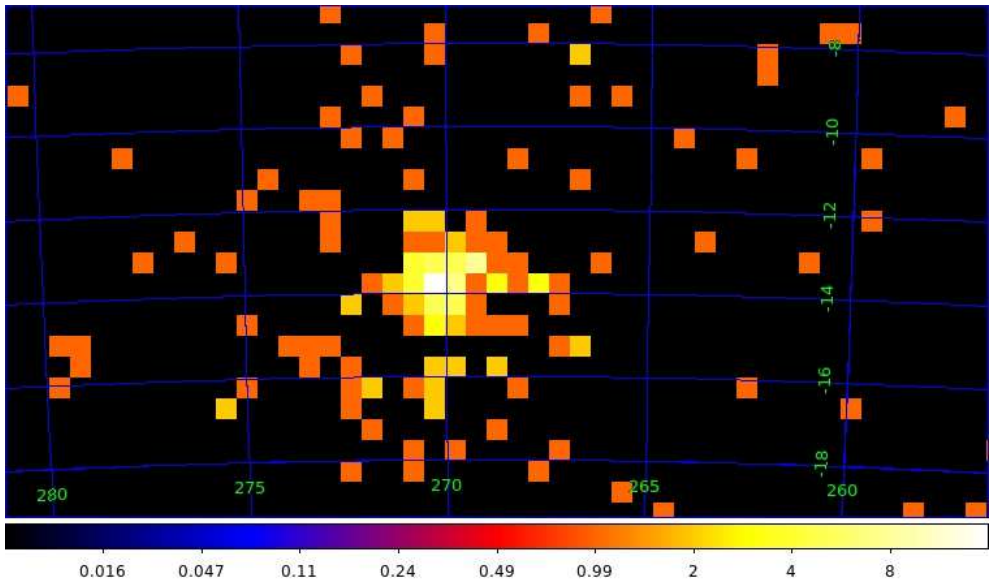


Figure 13 Carte de la région deGRB080916C

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.

Voir ftp://www.cenbg.in2p3.fr/astropart/VM/mov_015.gif pour un exemple d'animation sur ce sursaut gamma (créé par :

- create_movie 15 ait 243216000 243219600 300 120 -56 15)

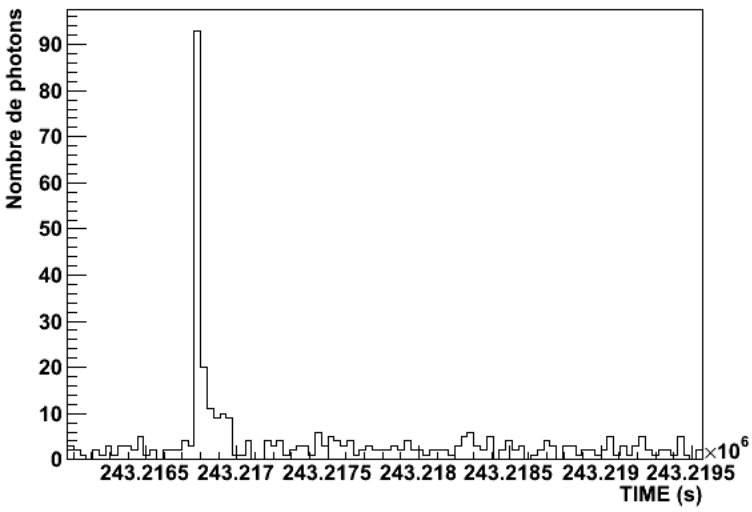


Figure 14 Distribution du temps d'arrivée des photons pendant l'heure où a eu lieu GRB080916C

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~80°,B~-60°) pendant cette période.

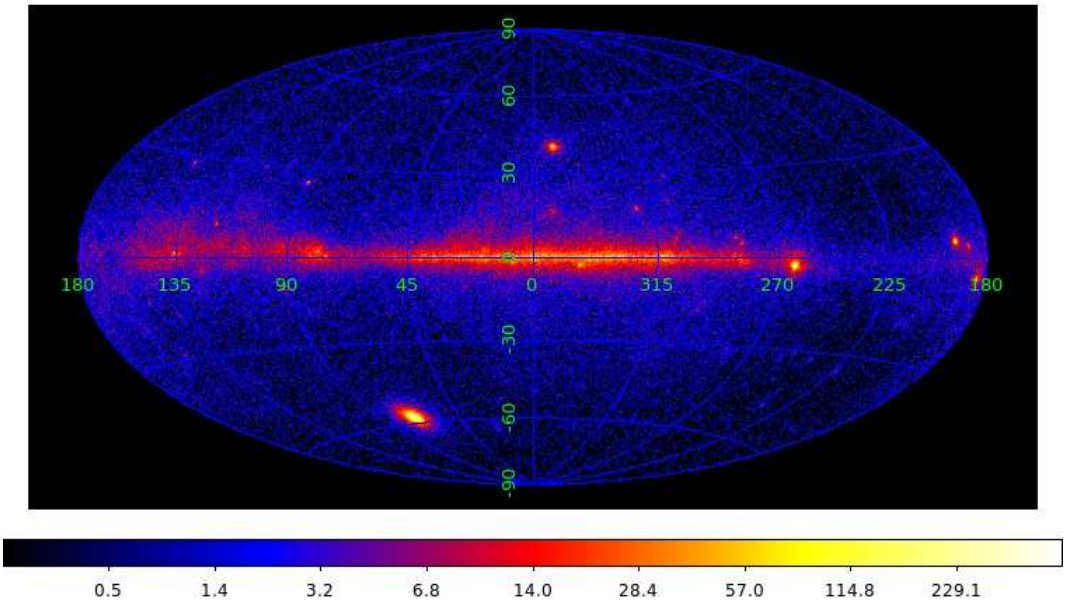


Figure 15 Carte du ciel montrant l' éruption solaire la plus brillante enregistrée par Fermi.

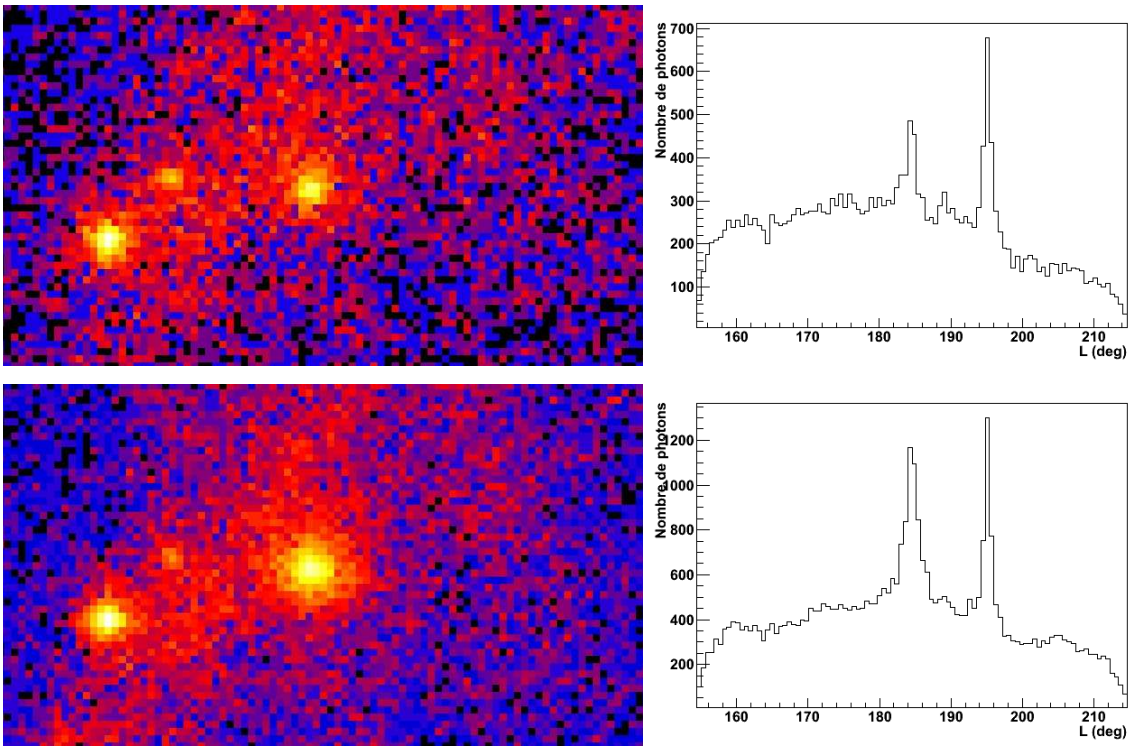
Voir ftp://www.cenbg.in2p3.fr/astropart/VM/mov_196.gif pour un exemple d'animation sur cette éruption (une image correspondant à 3h, la durée totale couvrant une semaine; créé par :

- create_movie 196 cel 0 0 11580 348 -5 15)

La nébuleuse du Crabe en éruption

La nébuleuse du Crabe (M1) est un reste de supernova abritant un pulsar. Ce pulsar génère un vent de particules qui alimente en énergie la nébuleuse environnante, constituée par l'interaction de la matière éjectée lors de l'explosion avec le milieu interstellaire. L'explosion date du 4 Juillet 1054 et a été reportée par les astronomes chinois de l'époque. Le pulsar et la nébuleuse émettent à la fois en rayons gamma. Sur les images produites avec le Fermi-LAT, il n'est pas possible de les distinguer spatialement bien que la nébuleuse soit étendue (6'x 4') car la résolution angulaire de l'instrument n'est pas suffisante. L'émission du pulsar est (quasi-)périodique avec une période de 33 ms alors que celle de la nébuleuse est continue. On a longtemps cru que l'émission de la nébuleuse ne variait que sur des échelles temporelles très longues (des dizaines d'années) , à telle point qu'elle était considérée comme la « chandelle standard » de l'Astronomie Gamma. On sait depuis 2009 que cette émission peut en fait varier sur des périodes beaucoup courtes de l'ordre d'une journée ou moins. Les propriétés de la zone émettrice (beaucoup plus petite que la nébuleuse entière) et les processus responsables de cette activité rapide restent très mal compris. Les figures ci-dessous montrent une région du ciel centrée sur la nébuleuse pour les semaines 196 (activité normale, en haut) et 248 (éruption, en bas). La source de gauche est le pulsar Geminga, qui sert de référence : habituellemet plus brillant que la nébuleuse du Crabe (figure du haut), il l'est moins dans la période d'éruption. Les projections sur l'axe horizontale (longitude galactique, L, avec le

sens de l’axe inversé, Geminga apparaissant à droite du Crabe) sont présentées dans les figures de droite.

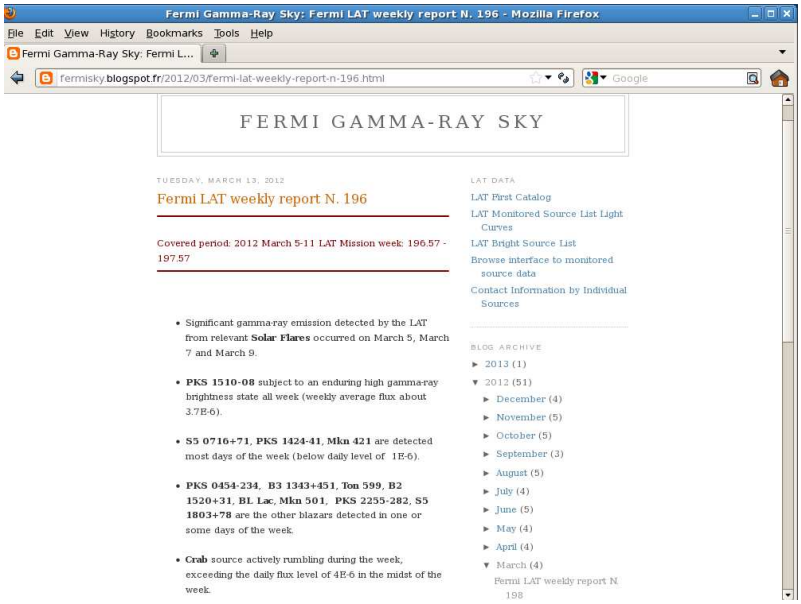


Utilisation du « blog de Fermi »

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.



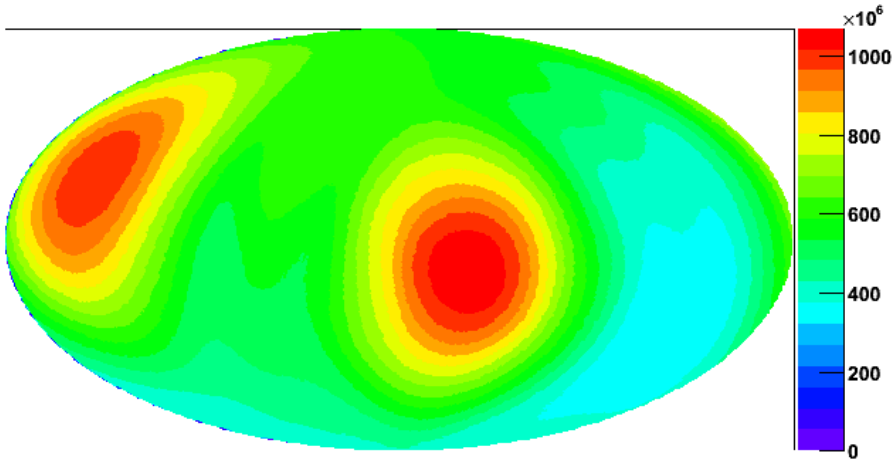
La commande « blog » crée également un fichier des positions des sources mentionnées dans le blog qui seront automatiquement superposées aux cartes créées ultérieurement par « create_map » (uniquement avec l'option 'ait') pour la semaine considérée.

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^2/s), le flux d'énergie (unité: erg/cm^2/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 continuement : S varie fortement avec l'angle θ 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.

Une carte d'exposition (pour des phtons d'énergie 1 GeV) peut être créée (après que les commandes fetch et fetch_sat aient été executées pour la semaine considérée) par la commande :
> create_exposure #semaine
La carte se trouve dans le fichier: figures/expo_aitoff_#semaine.gif
Un exemple est donné ci-dessous.



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 dûe 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 Γ, 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)[7]. 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 méme 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,Γ) qui reproduit correctement les données par une comparaison telle que celle de la figure ci-dessous. Elle nécessite un fichier de données créé par create_map pour une région centrée sur la source de rayon ~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=1.7x10^{-5} photons cm^{-2} s^{-1} (flux intégral au dessus de 100 MeV) et un indice spectral Γ de 2.3. F est typiquement de l'ordre de 10^{-6} - 10^{-5} ph cm^{-2} s^{-1} pour une source brillante, et Γ est compris entre 1.5 et 3. Dans le jargon scientifique, un spectre avec Γ faible (< 2) est appelé « dur », avec Γ grand, il est dit « mou ».

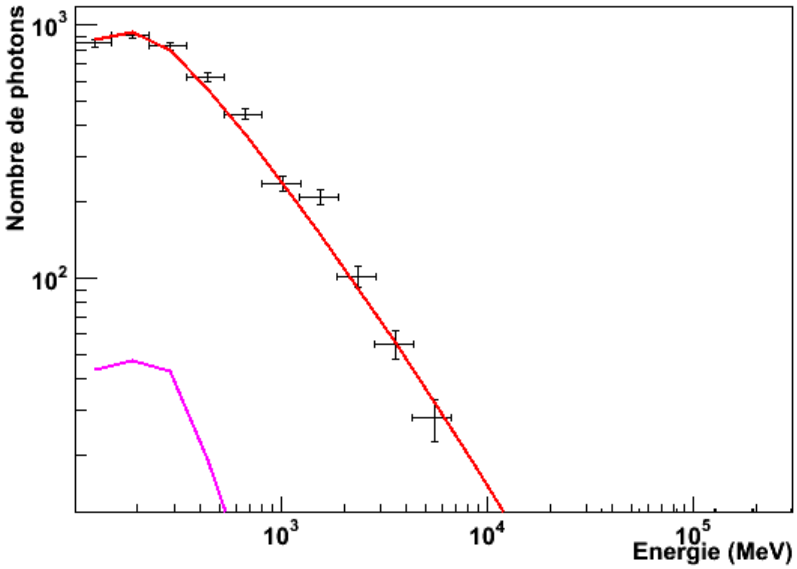


Figure 16 Distribution en énergie des photons sélectionnés dans une région autour de 3C 454.3. (croix noires). La courbe rouge représente un modèle dont les paramètres ont été ajustés manuellement pour reproduire correctement les données. La courbe magenta correspond à la contribution du fond diffus.

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

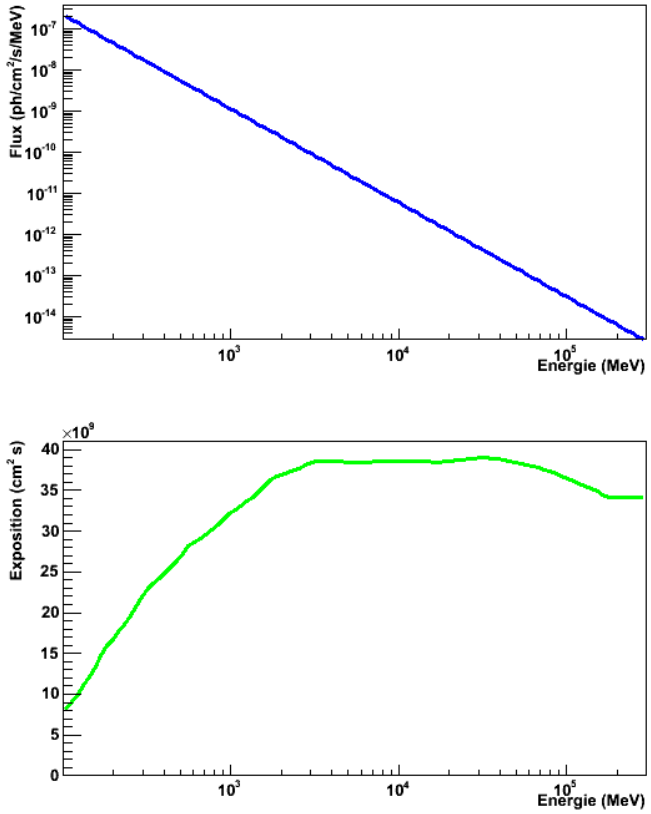


Figure 17 Panneau du haut: Distribution en loi de puissance du modèle utilisé. Panneau du bas: Courbe d'exposition en fonction de l'énergie des photons pour 3C 454.3 dans la semaine 196.