



Fermi

Gamma-ray Space Telescope

LE SPECTRE DES
ÉLECTRONS
COSMIQUES
PRIMAIRES DE 7
GeV À 1 TeV
AVEC LE
FERMI-LAT

Johan Bregeon

INFN-Pisa

johan.bregeon@pi.infn.it

pour la collaboration
Fermi-LAT

LAPP - 8 Janvier 2010

Le télescope spatial Fermi

Un observatoire : LAT et GBM

Le ciel gamma

Le LAT, un spectromètre à électrons

Sélection des électrons

Résolution en énergie

Sélection à grande longueur de radiation

Comparaison des spectres obtenus

Erreurs systématiques

Spectre des électrons cosmiques de 7 GeV à 1 TeV

Interpretation

Modèle conventionnel de diffusion

Modèle générique à deux composantes

Les pulsars proches

LE LANCEMENT !



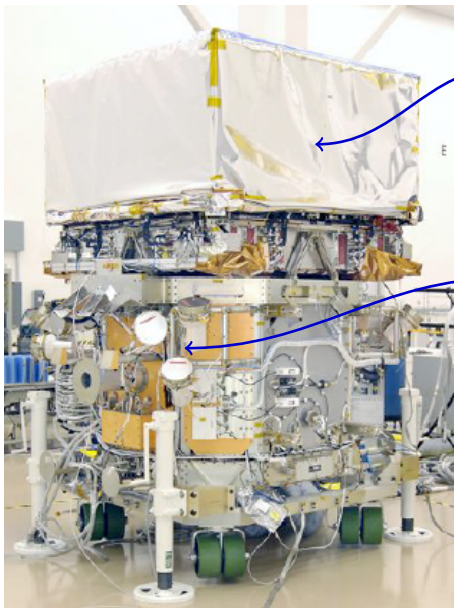
Lancement

- ▶ Jour
 - ▶ 11 Juin 2008
- ▶ Fusée
 - ▶ Delta 2920H-10
- ▶ Site
 - ▶ Kennedy Space Center

Orbite

- ▶ Trajectoire
 - ▶ 565 km, circulaire
- ▶ Inclinaison
 - ▶ 25.6°
- ▶ Durée de vie
 - ▶ 5 ans minimum

OBSERVATOIRE

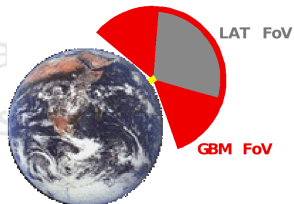


Large Area Telescope (LAT)

- ▶ Télescope à conversion de paires
- ▶ Énergie : 20 MeV–300 GeV

Gamma-ray Burst Monitor (GBM)

- ▶ 12 détecteurs NaI et 2 BGO
- ▶ Énergie : 8 keV–40 MeV



LA COLLABORATION FERMI-LAT

United States

- ▶ California State University at Sonoma
- ▶ University of California at Santa Cruz
- ▶ Goddard Space Flight Center
- ▶ Naval Research Laboratory
- ▶ Ohio State University
- ▶ Stanford University (SLAC and HEPL/Physics)
- ▶ University of Washington
- ▶ Washington University, St. Louis

PI : Peter Michelson (Stanford & SLAC)

- ▶ ~390 membres (dont ~96 chercheurs associés, plus de 68 postdocs, et 105 étudiants)
- ▶ Coopération entre la NASA et la DOE, avec des contributions clés de la France, de l'Italie, du Japon et de la Suède
- ▶ Dirigée par le SLAC National Accelerator Laboratory

Sweden

- ▶ Kalmar University
- ▶ Royal Institute of Technology
- ▶ Stockholm University

France

- ▶ IN2P3
- ▶ CEA/Saclay



Japan

- ▶ Hiroshima University
- ▶ ISAS/JAXA, RIKEN
- ▶ Tokyo Tech.

Spain

- ▶ ICREA
- ▶ Inst de Ciencies de l'Espai

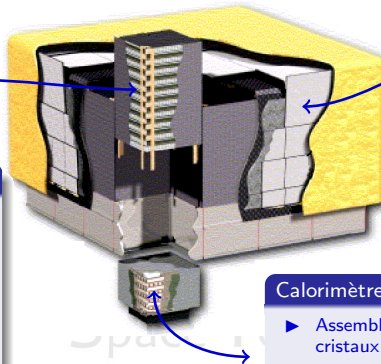
Italy

- ▶ INFN
- ▶ ASI

LE LARGE AREA TELESCOPE

Large Area telescope

- ▶ Design modulaire
- ▶ Grille 4×4 de tours identiques (chaque tour comprend un trajectographe et un calorimètre)
- ▶ L'ensemble des trajectographes est enfermé dans le détecteur d'anti-coïncidence (ACD)



Trajectographe

- ▶ Détecteur à pistes de Silicium, convertisseur en Tungstène ; $1.5 X_0$
- ▶ 10k détecteurs, 80 m^2 de surface active de Silicium, 1M voies d'électronique
- ▶ Trajectographie de haute précision, temps mort faible

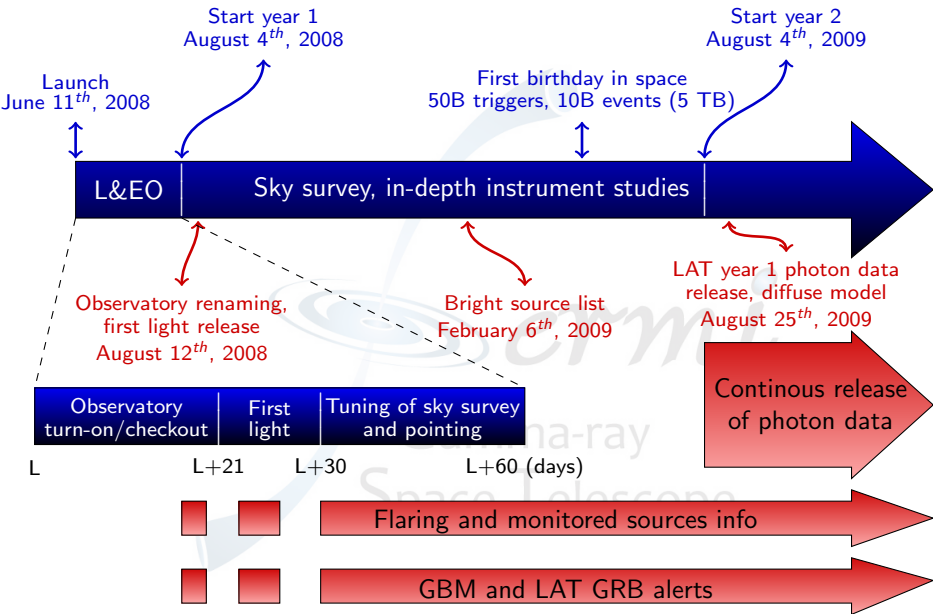
ACD

- ▶ Segmenté en 89 tuiles, réduction du self-veto à haute énergie
- ▶ Efficacité de détection moyenne : 0.9997

Calorimètre

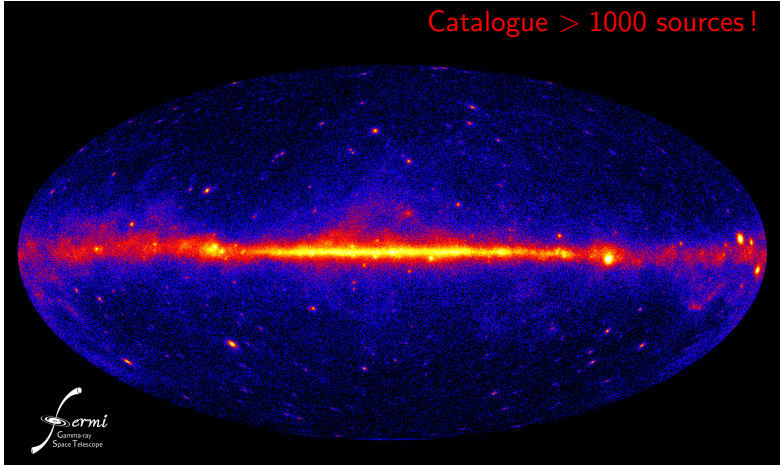
- ▶ Assemblage hodoscopique de 1536 cristaux de CsI(Tl) ; $8.6 X_0$
- ▶ Reconstruction du profil des cascades en 3D pour l'estimation de l'énergie et le rejet des hadrons

1 AN DE SCIENCE EN ORBITE



LE CIEL GAMMA, 1 AN DE DONNÉES DU LAT

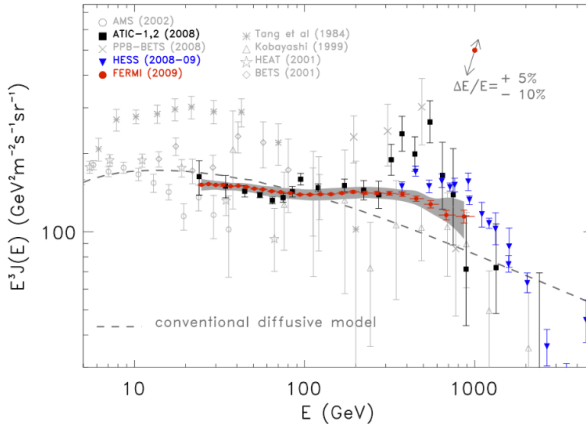
Catalogue > 1000 sources !



- ▶ Fermi a observé plus de 5 fois plus de sources haute énergie que celles déjà connues, y compris plusieurs nouveaux types de sources jamais observées auparavant.

ÉLECTRONS COSMIQUES DE 20 GeV À 1 TeV

Abdo, A. A. et al, PRL 102 181101 – Mai 2009



- ▶ Caractéristiques du spectre des électrons cosmiques
 - ▶ grande statistique, $\sim 4.5\text{M}$ d'évènements
 - ▶ erreurs dominées par les incertitudes systématiques
 - ▶ spectre en $E^{-3.0}$, sans forte variation

SOURCE DE DONNÉES BRUTES

DEUX SOURCES DIFFÉRENTES, DEUX TYPES D'ANALYSE

Le Fermi-LAT ne peut distinguer entre e^- et e^+ , le terme électrons désignera par la suite la somme $e^- + e^+$.

Filtre embarqué DGN, diagnostique

- ▶ Échantillon non-biaisé de tous les événements qui déclenche le LAT
- ▶ Pensé pour les diagnostics et l'étude de l'efficacité des filtres
- ▶ Pré-échantillonné d'un facteur 1/250 à bord pour cause de bande passante limitée
- ▶ ~ 20 Hz de taux de déclenchement
- ▶ Source principale de données pour les électrons cosmiques de basse énergie

Filtre embarqué GAMMA

- ▶ Filtre principal pour la pré-sélection des γ
- ▶ Condition *High pass* :
 - ▶ transmet au sol tous les événements dont l'énergie à bord est de plus de 20 GeV
 - ▶ source principale de données pour les électrons cosmique au-dessus de 20 GeV

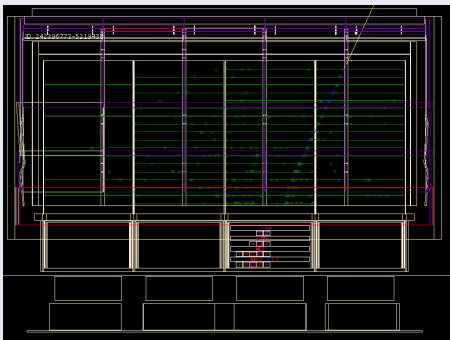
- ▶ Région de recouvrement entre (20 GeV - 100 GeV) utile pour comparer les analyses haute et basse énergie

⇒ Le flux important d'électrons autour de quelques GeV compense le pré-échantillonnage d'un facteur 250

CASCADES ÉLECTROMAGNETIQUES ET HADRONIQUES

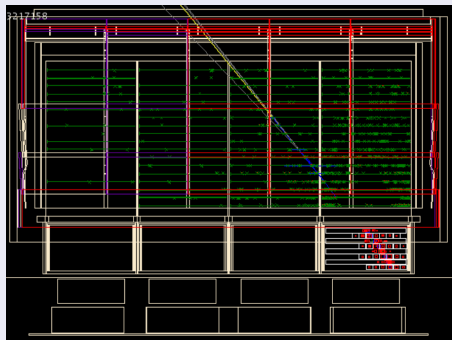
ÉVÈNEMENT D'ÉNERGIE ENTRE 772 GeV ET 1 TeV

Candidat électron



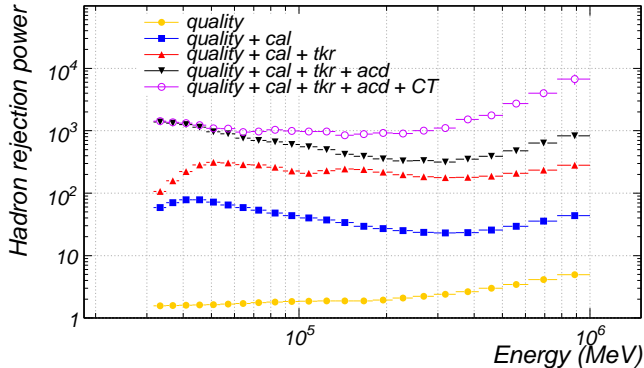
- ▶ peu de tuiles d'ACD touchées en relation avec la trajectoire reconstruite
- ▶ trace propre avec de nombreux clusters près de la trace
- ▶ cascade électromagnétique bien définie et symétrique dans le calorimètre

Candidat hadron



- ▶ grand dépôt d'énergie dans les tuiles de l'ACD
- ▶ peu de clusters autour de la trace principale, mais de nombreux clusters loin de la trace
- ▶ cascade large et asymétrique dans le calorimètre, *backsplash* important dans le trajectographe

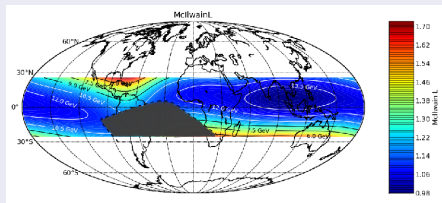
SÉLECTION DES ÉVÈNEMENTS



- ▶ Les 3 sous-systèmes contribuent à tous les niveaux
 - ▶ sélection minimum des évènements de qualité
 - ▶ étude détaillée de la topologie des évènements
 - ▶ analyse à l'aide d'arbres de classification
 - ▶ choix crucial des variables utilisées par les arbres
 - ▶ la puissance de rejet des hadrons nécessaire à haute énergie est obtenue par un coupure dépendant explicitement de l'énergie

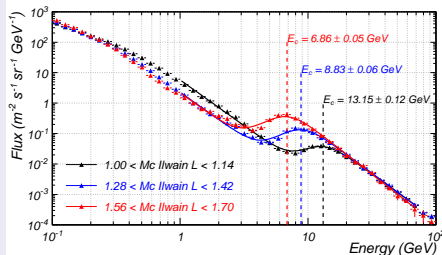
ANALYSE BASSE ÉNERGIE

Carte de McIlwain L et coupure géomagnétique



- ▶ le paramètre McIlwain L décrit le champ magnétique terrestre
- ▶ l'énergie la plus basse pour la mesure du spectre des électrons primaires, accessible pour le LAT est définie par l'orbite de Fermi
- ▶ sous la coupure : électrons secondaires, albedo
- ▶ au-dessus de la coupure : électrons primaires
- ▶ avec la statistique actuelle $E_{min} \sim 7 \text{ GeV}$

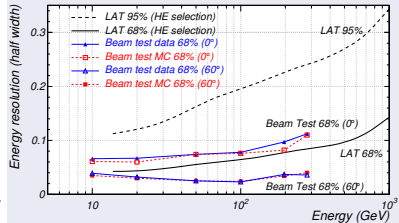
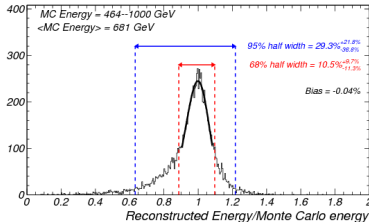
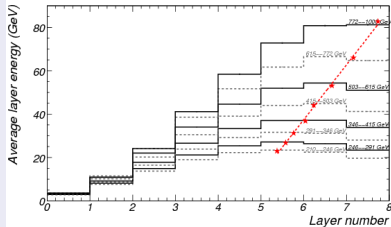
Spectre des électrons en divers bins de McIlwain L



- ▶ analyse indépendante et dédiée aux basse énergie
- ▶ mesure du spectre en divers bins de McIlwain L
- ▶ le spectre est ajusté par une formule empirique, provenant des modèles de spectre de rayons cosmiques utilisée pour les simulations et qui donne la valeur de l'énergie de la coupure, soit avec p les primaires :

$$\frac{dN}{dE} = c_s E^{\Gamma_s} + \frac{c_p E^{\Gamma_p}}{1 + \left(\frac{E}{E_c}\right)^6} \quad (1)$$

RÉSOLUTION EN ÉNERGIE



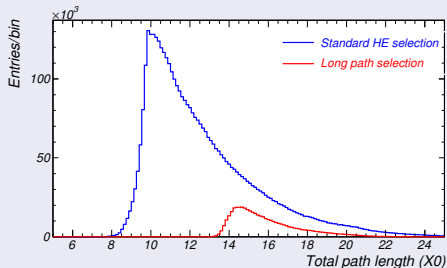
Cascades électromagnétiques

- Profils longitudinaux des cascades, nettement différents pour le détecteur, les candidats électrons traversent $\sim 12.5X_0$
- Résolution en énergie, contenu à 68% et 95% pour des évènements avec $464 < E < 1000 \text{ GeV}$, $< \Theta >$

- Validation sous faisceau avec la *Calibration Unit* jusqu'à 282 GeV
- Excellent accord sur l'ensemble de l'espace des phases, raisonnable d'utiliser les simulations jusqu'au TeV, résolution en énergie suffisante pour la mesure du spectre !
- Et pour les évènements à grande longueur de radiation ?

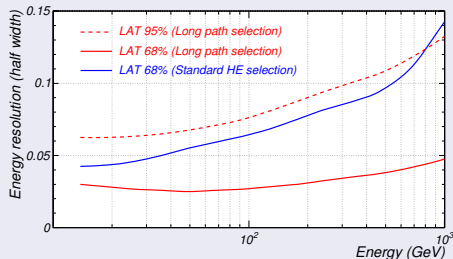
SÉLECTION À GRANDE LONGUEUR DE RADIATION

Longueur de radiation



- ▶ $X_0 > 13$: $12 X_0$ CAL + $1 X_0$ TKR
- ▶ $\sim 16 X_0$ en moyenne
- ▶ max des cascades à 1 TeV $\sim 10.9 X_0$

Résolution en énergie



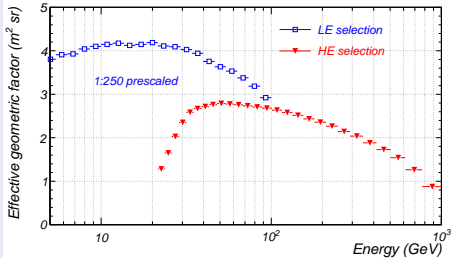
- ▶ résolution en énergie inférieure à 5% à 1 TeV
- ▶ l'acceptance n'est plus que 5% de l'acceptance standard

- ▶ Critique à haute énergie pour limiter les pertes d'énergie
- ▶ Sous-sélection à partir de la sélection standard
 - ▶ ré-optimization minimale de quelques coupures

⇒ Meilleure résolution en énergie, mais les erreurs systématiques sont plus grandes

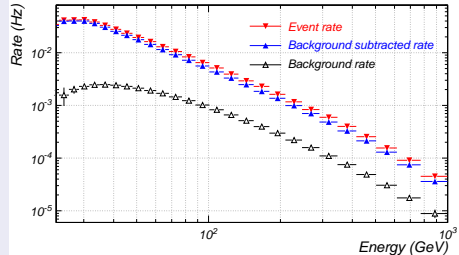
ACCEPTANCE ET FOND HADRONIQUE RÉSIDUEL

CRE Acceptance géométrique



- acceptance géométrique maximum de 2.8 m²
- 2 m² à 300 GeV, 1 m² à 1 TeV
- basse énergie par le filtre DGN, pre-échantillonnée d'un facteur 250
- un ordre de grandeur supérieur aux expériences précédentes

Contamination hadronique

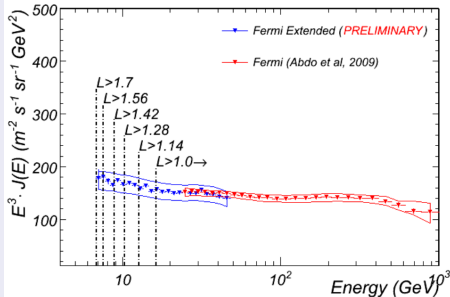


- varie de quelques pourcents à $\simeq 20\%$ sur la gamme d'énergie
- estimation réalisée à partir de larges simulation Monte-Carlo, utilisant les modèles de flux de rayons cosmiques de 10 MeV à 10 TeV
- taux de hadron résiduel soustrait aux candidats électrons

⇒ Meilleur compromis entre l'acceptance pour les électrons, la capacité de rejet des hadrons et le contrôle des incertitudes systématiques

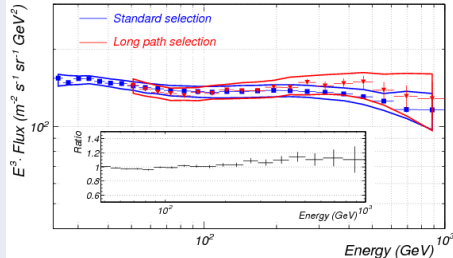
COMPARAISON DES SPECTRES OBTENUS

Analyse basse énergie



- analyse largement indépendante
- recouvrement entre 20 GeV et 50 GeV

Grandes longueur de radiation



- excellente résolution en énergie ($< 5\%$)
- mais incertitudes systématiques plus grandes
- aucune particularité spectrale mise en évidence

- ⇒ Spectres compatibles dans la bande d'erreurs systématiques
- ⇒ Extension du spectre à basse énergie

1. Incertitude sur l'acceptance

- ▶ étude extensive de l'accord entre données et Monte-Carlo pour toutes les variables de la sélection
- ▶ l'impact des différences résiduelles est estimé et inclus dans le spectre comme incertitudes de l'ordre de quelques % à $\simeq 20\%$
- ▶ incertitude supplémentaire de l'ordre de $+10\%$ à basse énergie à cause des événements multiples dans le détecteur

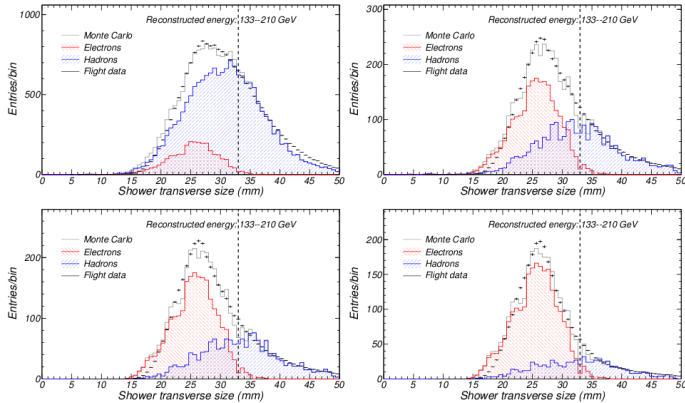
2. Normalisation du spectre des protons primaires

- ▶ l'incertitude sur le modèle est de l'ordre de $\simeq 20\%$ à 1 TeV
- ▶ impact sur le spectre via la soustraction de la contamination hadronique résiduelle

3. Étalonnage absolu en énergie du LAT

- ▶ incertitude sur le spectre ne dépendant pas de l'énergie
- ▶ d'après les données faisceau, l'étalonnage en énergie et les données en orbite, l'incertitude sur la valeur absolue de l'énergie est $(+5\%, -10\%)$

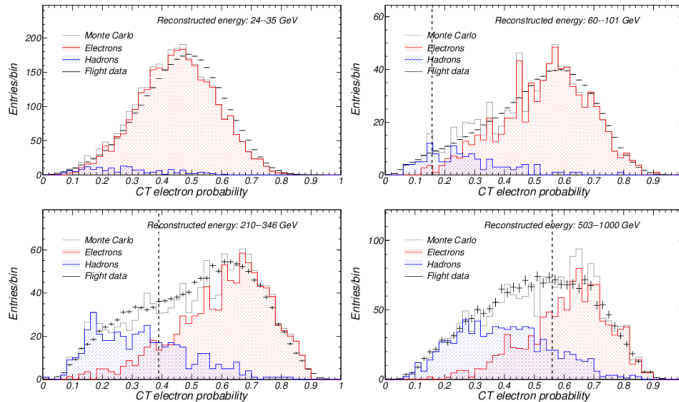
COMPARAISONS DONNÉES ET SIMULATIONS (1)



Profil transverse dans le calorimètre à divers stades de la sélection

- ▶ coupure sur le calorimètre sauf profil transverse
- ▶ ajout des coupures sur le trajectographe, puis sur l'ACD, puis sur les arbres de classification
- ▶ excellent accord entre données et simulations Monte-Carlo

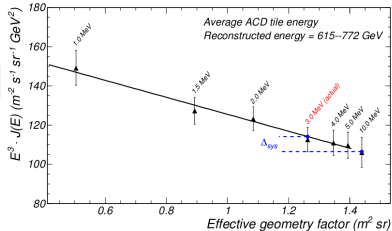
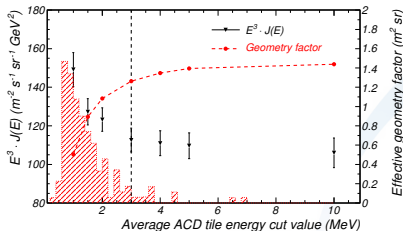
COMPARAISONS DONNÉES ET SIMULATIONS (2)



Variable issue de la combinaison des arbres de classification pour diverses énergies

- ▶ le résultat des arbres de classification est une variable comme les autres du point de vue de la validation et de l'estimation des incertitudes systématiques
- ▶ la valeur de la coupure dépend explicitement de l'énergie : non utilisée à 25 GeV, importante à 600 GeV pour réduire la contamination hadronique
- ▶ excellent accord données Monte-Carlo sur toute la gamme d'énergie

ESTIMATION DES ERREURS SYSTÉMATIQUES

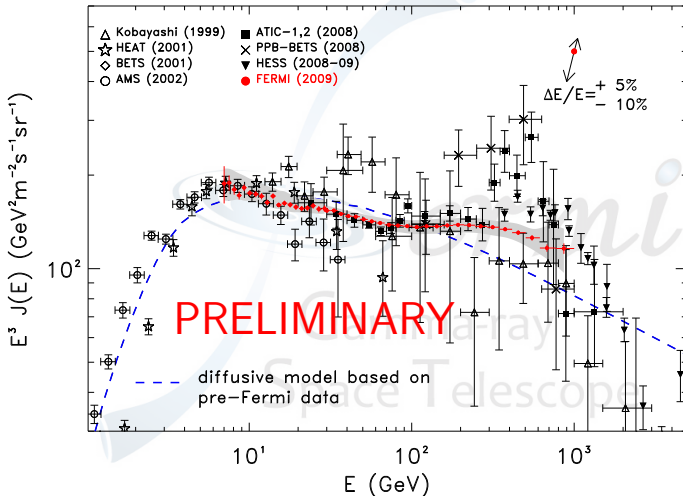


Le flux reconstruit dépend de la valeur de la coupure appliquée

- ▶ pour chaque variable de la sélection et pour chaque bin d'énergie
 - ▶ scan de la valeur de coupure, en partant d'une valeur pour laquelle la coupure ne joue aucun rôle, jusqu'à la valeur choisie
 - ▶ le valeur du flux reconstruit varie linéairement avec la valeur de la coupure
 - ▶ par extrapolation on estime quelle serait la valeur du flux si la variable n'était pas utilisée
 - ▶ l'écart de cette valeur à la valeur nominale donne l'ordre de grandeur de l'incertitude systématique
- ▶ pour chaque bin en énergie les incertitudes positives d'un côté et négatives de l'autre sont sommées en quadrature

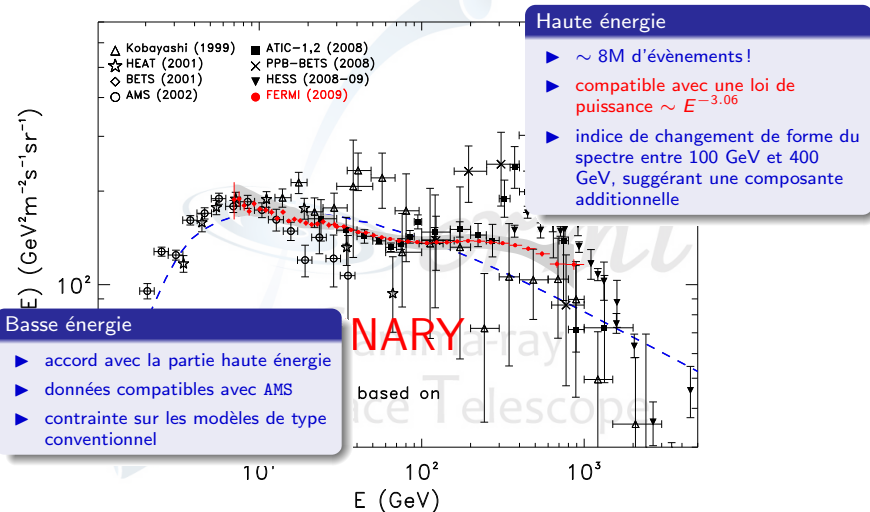
SPECTRE DES ÉLECTRONS COSMIQUES DE 7 GEV À 1 TEV

1 AN DE DONNÉES : 4 AOÛT 2008 AU 4 AOÛT 2009

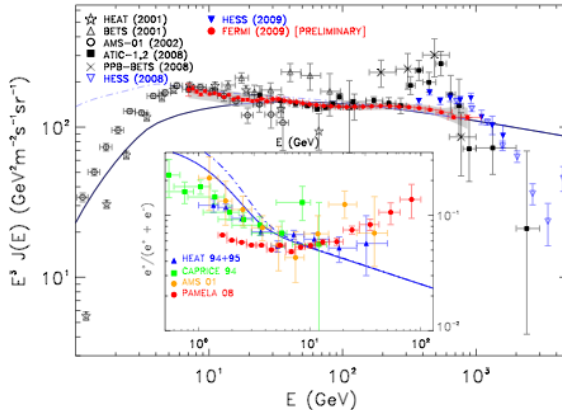


SPECTRE DES ÉLECTRONS COSMIQUES DE 7 GeV À 1 TeV

1 AN DE DONNÉES : 4 AOÛT 2008 AU 4 AOÛT 2009

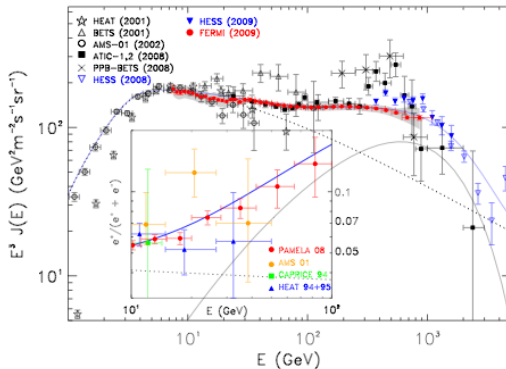


MODÈLE *conventionnel* DE DIFFUSION



- ▶ Ajustement du modèle conventionnel de diffusion, injection $\gamma_0 = 2.42$ au lieu de $\gamma_0 = 2.52$
 - ▶ problème à basse énergie, flux sous-estimé par rapport :
 - ▶ aux données d'AMS
 - ▶ aux nouvelles données du LAT en-dessous 20 GeV
 - ▶ incompatible avec la fraction de positron mesurée par PAMELA

MODÈLE GÉNÉRIQUE À DEUX COMPOSANTES

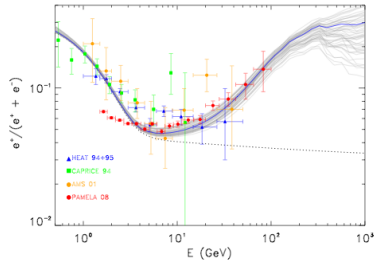
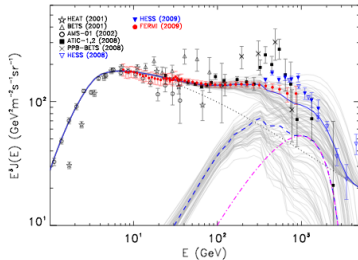


- ▶ Ajout d'une composante supplémentaire
 - ▶ modèle conventionnel $\gamma_0 = 2.7$, e.g. Strong et al. 2004
 - ▶ cas général d'une distribution de sources galactiques
 - ▶ injection de paires e^\pm avec un spectre en $E^{-\alpha} e^{-\frac{E}{E_{cut}}}$
 - ▶ $\alpha = 1.5$ et $E_{cut} = 1 \text{ TeV}$
- ▶ Origine astrophysique ou matière noire ?

UNE POSSIBILITÉ : LES PULSARS PROCHES (1)

- ▶ Candidat comme sources d'électrons et positrons relativistes (ref. Shen 1970, Harding & Ramaty 1987)
 - ▶ e^{\pm} sont probablement produites dans la magnétosphère et ré-accélérées dans le vent du pulsar
 - ▶ Caractéristiques nécessaires pour générer la composante additionnelle
 - ▶ proche : à cause des pertes d'énergie par synchrotron
 - ▶ mature : car les électrons restent confinés dans la nebulae jusqu'à la dispersion dans le MIS
 - ▶ mais pas trop vieux : par diffusion les vieux électrons sont dilués dans le MIS
- ⇒ Considérons une distribution de pulsars du catalogue ATNF
- ▶ distance $d < 3 \text{ kpc}$ et age $5.10^4 \text{ yr} < T < 10^7 \text{ yr}$
 - ▶ échantillonnage aléatoire des paramètres dans une gamme raisonnable
 - ▶ index d'injection, énergie de coupure, efficacité de conversion des e^{\pm} , délai naissance du pulsar – injection des électrons
 - ▶ génération des contributions possibles pour *tous* les pulsars

UNE POSSIBILITÉ : LES PULSARS PROCHES (2)



► Spectre des électrons avec une composante additionnelle due aux pulsars proches

- ligne pointillée : modèle conventionnel $\gamma_0 = 2.7$, e.g Strong et al. 2004
- **bleue interrompue** : contribution moyenne des pulsars
→ chaque ligne grise est une réalisation particulière de l'échantillonnage des paramètres
- **bleue continue** : spectre total attendu

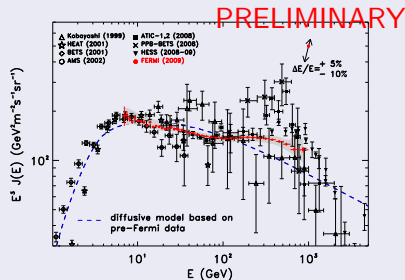
⇒ Interpretation raisonnable des données de Fermi, Pamela et HESS

CONCLUSIONS ET PROSPECTIVES

Conclusions

- ▶ spectre des électrons cosmiques primaires de 7 GeV à 1 TeV avec un an de statistique
- ▶ événements à grande longueur de radiation, faible dépendance de la mesure par rapport à la résolution en énergie
- ▶ mesure du spectre en dessous de 20 GeV, contrainte forte sur les modèles de propagation
 - ▶ modèle de diffusion (difficilement) ré-ajusté
 - ▶ ajout d'une composante supplémentaire, d'origine astrophysique ou matière noire
 - ▶ les pulsars proches et pas trop vieux sont d'excellents candidats

Fermi-LAT CRE spectrum



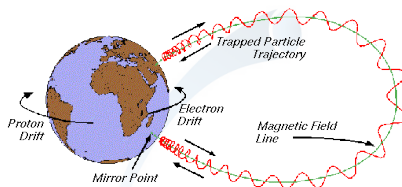
Travaux prévus

- ▶ publication des détails de l'analyse (en cours de rédaction)
- ▶ recherche d'anisotropie, plusieurs méthodes en cours de développement (cf. Fermi Symposium 2009)
 - ...et dans un futur plus lointain...
- ▶ extension de l'énergie au-delà du TeV
- ▶ réduction des incertitudes systématiques, matrice de corrélation des erreurs

The Fermi logo is a large, light blue graphic that serves as a background. It consists of a stylized 'F' shape formed by two curved, tube-like segments. In the center of the 'F' is a circular ripple pattern with three concentric rings.

Extra Slides

Fermi
Gamma-ray
Space Telescope



The value of L denotes the distance in Earth radii from the center of the equivalent dipole to the equatorial crossing for that drift shell. Positions on the same field line in the distorted Earth's field will have very nearly the same values of L . It is convenient to express L (normalized to Earth radii) as a function of geomagnetic latitude :

$$L(\lambda) = 1 / \cos^2 \lambda \quad (2)$$

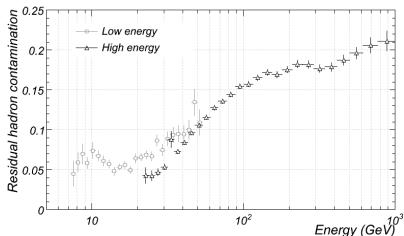
PRODUCTION DE SIMULATIONS MONTE-CARLO

Task Filter: <input type="text" value="v15r39p1"/> <input type="checkbox"/> Regular Expression (?) Tasks with Runs <input type="button" value="v"/> Latest Task Versions <input type="button" value="v"/> Filter <input type="button" value="Reset Defaults"/>												
Last Active	Task Name	Type										Total
2009-03-16 08:41	backgnd-GR-v15r39p1-FullDay	MC	0	0	0	100000	0	0	0	0	0	100000
2009-03-16 05:43	hePro-GR-v15r39p1-Lyon	IN2P3	0	0	0	184773	14863	0	364	0	0	200000
2009-02-05 01:35	allHEE200GeV-GR-v15r39p1	MC	0	0	0	40000	411	0	16	0	0	40427
2008-12-29 02:51	allPro-GR-v15r39p1-Lyon	IN2P3	0	0	0	100000	0	0	0	0	0	100000
2008-12-10 03:29	allHEE-GR-v15r39p1-Lyon	IN2P3	0	0	0	1000	0	0	0	0	0	1000
2008-12-06 06:54	backgnd-GR-v15r39p1-HE-350	MC	0	0	0	259999	2	0	0	0	0	260001
2008-11-25 03:43	backgnd-v15r39p1-FD-Lyon	IN2P3	0	0	0	200	0	0	0	0	0	200
2008-11-03 04:30	allHEE10MeV-GR-v15r39p1	MC	0	0	0	20000	0	0	0	0	0	20000
2008-10-25 12:08	allHEE10GeV-GR-v15r39p1	MC	0	0	0	35000	4	0	0	0	0	35004
2008-10-23 02:58	backgnd-GR-v15r39p1-HE-100	MC	0	0	0	40000	1	0	0	0	0	40001
2008-10-23 01:39	backgnd-GR-v15r39p1-HE-600	MC	0	0	0	10000	0	0	0	0	0	10000
Totals			0	0	0	790,972	15,281	0	380	0	0	

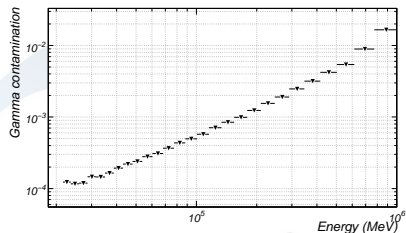
- Fermes de calcul de SLAC, de Lyon via la *pipeline* du SLAC
- Utilisation de la **GRID** en Italie (Pise, Trieste, CNAF) :
~ 200k runs
- Étude des lectrons : l'ensemble des simulations correspond
l'utilisation de 400 CPU pendant 80 jours

RESIDUAL BACKGROUND

Residual hadronic contamination



Expected γ -ray contamination

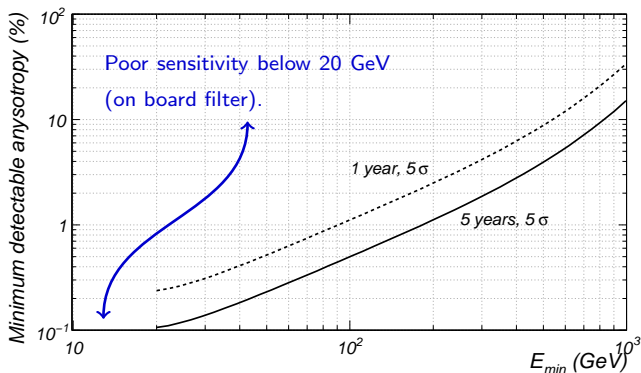


- ▶ Hadronic contamination rises from few percent to $\simeq 20\%$ over the whole energy range
 - ▶ estimated from a large Monte-Carlo simulation, using *standard* cosmic ray models from 10 MeV to 10 TeV
 - ▶ subtracted from the candidate electrons
- ▶ γ -ray contamination is less than 2% in the highest energy bin
 - ▶ conservative estimation extrapolating EGRET total γ -ray flux measurement
- not subtracted from the candidate electrons

TRIGGER AND FILTER

- ▶ Five hardware trigger primitives (at the tower level).
 - ▶ TKR : three x-y tracker planes hit in a row.
 - ▶ CAL_LO : single log with more than 100 MeV.
 - ▶ CAL_HI : single log with more than 1 GeV.
 - ▶ ROI : MIP signal in a ACD tiles close to a triggering tower.
 - ▶ CNO : heavy ion signal in the ACD.
- ▶ Upon L1 trigger the entire detector is read out.
- ▶ Need onboard filtering to fit the data volume within the allocated bandwidth.
 - ▶ GAMMA : rough onboard photon selection.
 - ▶ All events with raw energy greater than 20 GeV downlinked.
 - ▶ Primary source of high-energy $e^+ e^-$.
 - ▶ HIP : heavy ions for CAL calibration.
 - ▶ DGN : prescaled ($\times 250$) unbiased sample of all trigger types.
 - ▶ Source of low-energy $e^+ e^-$, decent statistics up to 100 GeV.
 - ▶ MIP : straight tracks for alignment (only in dedicated runs).

MEASUREMENT OF ANISOTROPIES : STATISTICS



- ▶ Limit for the integral dipole anisotropy set by $\delta = \frac{\sqrt{2}N_{\sigma}}{\sqrt{N_{\text{events}}}}$
- ▶ The plot includes the main instrumental effects :
 - ▶ Energy-dependent effective geometry factor ;
 - ▶ Instrumental dead time and duty cycle ;
 - ▶ On board filter.
- ▶ Room for improvements with a better event selection !