



GLAST-LAT

### Contribution à l'étalonnage en énergie du calorimètre du GLAST-LAT et qualification des modèles de cascade hadronique dans GEANT4.

Johan Bregeon



**•** Astronomie  $\gamma$ 

- $\checkmark$  Emission de photon- $\gamma$
- Blazars
- GLAST et EGRET
- GLAST
- Etude du quenching de la scintillation du CsI(TI)
- Qualification des modèles de cascades hadroniques disponibles dans GEANT4



Astronomie  $\gamma$ 

#### GLAST

- Large Area Telescope
- LAT : étalonnage en énergie
- LAT : identification des  $\gamma$
- Etude du quenching de la scintillation du CsI(TI)
- Qualification des modèles de cascades hadroniques disponibles dans GEANT4



- Astronomie  $\gamma$
- GLAST



- Etude du quenching de la scintillation du Csl(Tl)
  - Scintillation du CsI(TI) et effets de quenching
  - Mise en oeuvre du faisceau-test au GANIL
  - Analyse des données
  - Bilan des mesures
- Qualification des modèles de cascades hadroniques disponibles dans GEANT4

- Astronomie  $\gamma$
- GLAST



- Etude du quenching de la scintillation du CsI(TI)
- Qualification des modèles de cascades hadroniques disponibles dans GEANT4
  - Cascades hadroniques et Simulations
  - Observables
  - Etude basse énergie (faisceau-test GSI)
  - Etude haute énergie (faisceau-test CERN)

# **Emission de photons** $\gamma$

#### Emission non-thermique : $E_{\gamma} > 1 MeV$

processus électromagnétique

pour un  $e^-$  relativiste de facteur de Lorentz  $\gamma$ 

rayonnement synchrotron dans un champ magnétique B

**J** diffusion Compton inverse dans un champ de photon  $\nu_s$ 

• 
$$\nu_{IC} \simeq \frac{4}{3} \gamma^2 \nu_s$$

#### processus hadronique

**Désintégration de**  $\pi_0$ 

• 
$$\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$$

#### sources

restes de supernovae

pulsar

blazars : exemple choisi

#### **Blazars**

- galaxie avec un trou noir super-massif
- disque d'accrétion en rotation et jets ultra-relativistes



### **Blazars**

- galaxie avec un trou noir super-massif
- disque d'accrétion en rotation et jets ultra-relativistes
- émission variable à large spectre



- 93 blazars dans le 3ème catalogue d'EGRET
- GLAST devrait en observer plusieurs milliers.

## **GLAST vs EGRET**

Caractéristique/Mission	EGRET	GLAST-LAT	
Durée	1991-2000	2007	
Champ de vue (sr)	0.5	2.4	
Résolution Angulaire $(1)$	$1.3^{\circ}$	$0.4^{\circ}$	
Surface Effective $^{(2)}$	$1100 cm^{2}$	$10000 cm^2$	
Sensibilité <sup>(3)</sup>	$10^{-7}$	$3 \times 10^{-9}$	
Résolution en énergie $^{(2)}$	20%	10%	
Gamme d'énergie	30 MeV - 30 GeV	30MeV - 300GeV	
Temps Mort	100 ms/evt	$30 \mu s/evt$	
Précision de la datation	$100 \mu s$	$\leq 3\mu s$	

Comparaisons des caractéristiques attendues pour le télescope spatial GLAST-LAT, avec

celles de son prédécesseur EGRET :

$$(1)$$
 à 1 GeV pour 1 photon

(2) à 100MeV

(3)  $\gamma cm^{-2} s^{-1}$  au-dessus 100MeV sur 1an.

- Astronomie  $\gamma$
- GLAST
  - Large Area Telescope
  - LAT : étalonnage en énergie
  - LAT : identification des  $\gamma$
- Etude du quenching de la scintillation du CsI(TI)
- Qualification des modèles de cascades hadroniques disponibles dans GEANT4

## **GLAST-LAT**

- $\checkmark$  photons  $\gamma$  de 30 MeV à 300 GeV
- **9** 16 modules identiques : carré  $4 \times 4$



# **GLAST-LAT**

- **•** photons  $\gamma$  de 30MeV à 300GeV
- **9** 16 modules identiques : carré  $4 \times 4$



Bouclier

anti-micrométéorites

Simulation d'un  $\gamma$  traversant le LAT

#### Vue du LAT

Trajectographe 16\*(2 XY Si + W) + 2\*(2 XY) = 1.3 X0

Détecteur en anticoincidenc

> segmenté 89 tuiles

## **GLAST-LAT :** CsI

CDE : Cristal Detector Element

- cristal de Csl(Tl) :  $326 \times 26.7 \times 19.9mm$
- double photodiode à chaque extrémité
- enveloppé d'un film réfléchissant



amplificateurs de gain fort et faible pour chaque photodiode





• effets de quenching dans le CsI, pour un ion  $(^{Z}_{A}X, E)$ 

30 septembre 2005 - p.9/33



#### • effets de quenching dans le CsI, pour un ion ( $^{Z}_{A}X, E$ )

 $E_{Mesuree} \propto \text{Lumière} \not\propto E_{Deposee}$ 



• effets de quenching dans le CsI, pour un ion  $(^{Z}_{A}X, E)$ 

Mesures existantes seulement pour E < 100 MeV/n



• effets de quenching dans le CsI, pour un ion  $(^{Z}_{A}X, E)$ 

Mesures au GSI à 1.7 GeV/n et au GANIL à 73 MeV/n

## **GLAST-LAT** : Identification des $\gamma$

Le flux de rayons cosmiques est très intense en comparaison du flux de photons- $\gamma$ .

Taux de déclenchement de GLAST

Déclenchement	Taux moyen		
Niveau 1	>4000Hz		
Niveau 3	$\simeq 300 Hz$		
Taux de $\gamma$	$\simeq 10 Hz$		

Identifi cation des  $\gamma$ 

- fi ltrage à bord
- analyse au sol
  - $\Rightarrow$  Le taux de rejet recherché est de  $10^6 : 1$
- algorithmes basés sur les simulations Monte-Carlo

⇒ Contrôle de la simulation des cascades hadroniques

- Astronomie  $\gamma$
- GLAST
- Etude du quenching de la scintillation du Csl(Tl)
  - Scintillation du CsI(TI) et effets de quenching
  - Mise en oeuvre du faisceau-test au GANIL
  - Analyse des données
  - Bilan des mesures
- Qualification des modèles de cascades hadroniques disponibles dans GEANT4

# **Scintillation et quenching**



Etude des matériaux scintillants par Birks (1951) :

$$\frac{dL}{dx} \propto \frac{S \overline{dx}}{1 + K \frac{dE}{dx}}$$

• Facteur de quenching :  $\Omega = \frac{dL}{S} \propto \frac{S}{S}$ 

$$U = \frac{dE}{dE} \propto \frac{S}{1 + K \frac{dE}{dx}}$$

Colonna (1992) et INDRA (2000)

lons	Carbone		
E(MeV/n)	$rac{L}{E} Colonna $	$\frac{L}{E} INDRA $	
5	0.28	0.28	
10	0.38	0.43	
20	0.44	0.58	
30	0.46	0.65	

# **Scintillation et quenching**



#### **GANIL** : Dispositif expérimental

- Production d'ions de nature et d'énergie différentes
- $\Rightarrow$  Faisceau de <sup>78</sup>Kr à 73MeV/nucléon et cibles d'épaisseurs différentes
- Identifi cation des ions (Z,E)
- $\Rightarrow$  Télescope :  $\Delta E_{Si}$  (linéaire)  $E_{CsI}$  (quenching)
- $\Rightarrow$  Temps de vol de la particule



#### Schéma du dispositif Barreau du Haut 89 mu 89 mu 500 mu T1 T2 T5 Faisceau Barreau du Bas 84 mu 89 mu 500 mu T3 T4 T6 silicium

#### Détecteur en place dans la cuve à vide

## **GANIL** : Etalonnage en énergie

#### **Détecteurs Silicium**

- Pics élastiques :  $^{78}Kr$
- Source alpha 3 pics
- accord à 5% près





- Détecteurs Csl
  - $\checkmark$  Source  $^{22}Na$
  - Pics à 1.275MeV et
     1.786MeV (coincidences)
  - Simulation Monte-Carlo

30 septembre 2005 - p.14/33

### **GANIL** : Détermination du quenching



#### Interpolation





#### <u>Méthode</u>

- Détermination des lignes de Z
  - Calculs des dépôts d'énergie
- Interpolation de  $E_{Deposee}$  à partir de  $L_{Mesuree}$  pour un même  $\Delta E_{Si}$

 $\Rightarrow L_{Mesuree} = F(E_{Deposee})$ 

#### **GANIL** : Détermination du quenching

#### Données Tel1 GDHs Calib mybihist1 Entries 2341082 dE in Si (MeV) 08 00 217.8 15.24 Vean v 238.8 23.22 Z=12-1Ŏ Z=8 1Ő 40 10 20 0 200 400 600 800 1000 Light in Csl (MeV)

#### Interpolation





#### <u>Méthode</u>

- Détermination des lignes de Z
- Calculs des dépôts d'énergie
- Interpolation de  $E_{Deposee}$  à partir de  $L_{Mesuree}$  pour un même  $\Delta E_{Si}$

 $\Rightarrow L_{Mesuree} = F(E_{Deposee})$ 

#### 30 septembre 2005 – p.15/33

#### **GANIL** : Fonctions de lumière Si minces

- ions lourds  $Z \ge 6$
- 0 < E < 73 MeV/nuc
- bon accord entre les différents lots de données

#### Comparaison T2PDHs vs T3PDBs





#### Comparaison T2PDHs vs T3PDBs



#### **GANIL** : Fonctions de lumière Si épais

- Les courbes de lumière ne passent pas par l'origine.
- ⇒ Problème d'étalonnage, de calcul, d'épaisseur ?
- Détermination empirique des épaisseurs
- ⇒ superposer les fonctions de lumière des télescopes épais sur celles des télescopes minces



### **GANIL** : Etude en temps de vol

- Time to Amplitude Converter: mesure du temps
- Time Generator : pente
- Tps absolu : pic élastique



Tps de vol : Pic Elastique

### **GANIL** : Etude en temps de vol

Tps de vol : Pic Elastique



<sup>30</sup> septembre 2005 – p.18/33

### **GANIL** : Temps de vol et quenching



Sélection z = 8

#### **GANIL** : Temps de vol et quenching

- $\Rightarrow$  Corrélation ( $E_{CsI}, TOF$ )
- Le Temps de vol est utilisé comme référence.



#### $(E_{CsI}, TOF) z = 8$ Courbes E\_CsI vs Temps de vol pour z=8 (su 15 GF 20F 25 30F E-TOF Z=8 quenchin 35 40 45 dataT1 O dataT4 50F Simu 89mu 55 200 400 600 800 1000 0 Energie CsI (MeV) Détecteurs épais

#### Fonctions de lumiere T6 : z=6 et z=10 (TOF) (MeV) ក្ល ខ្ល ប t0 + 2.5nsə.500 Tumi 400 300 200 100 100 0 200 300 400 500 600 700 800 900 Energie CsI (MeV)

30 septembre 2005 - p.19/33

#### **GANIL** : Comparaisons TOF - $E \Delta E$



Détecteurs minces : bon accord global entre les mesures en temps de vol et les mesures en  $E\Delta E$ 

Détecteurs épais : accord obtenu après ajustement du temps absolu



30 septembre 2005 - p.20/33

### **GANIL** : Bilan des mesures



Fonctions de lumière pour les ions légers :  $z \le 6$  et  $0 \le E \le 73 MeV/n$  (incertitude de 15%)

Fonctions de lumière pour les ions lourds :  $6 \le z \le 36$  et  $0 \le E \le 73 MeV/n$ (incertitude de 5%)

# Mesures à haute énergie au GSI

- Mesures de quenching réalisées au GSI pour des ions relativistes
- $\frac{dL}{dE} > 1$ : "antiquenching", pour un même dépôt d'énergie les ions génèrent plus de lumière que les protons
  - fi ltrage de la composante lente du signal par l'électronique ?
  - à haute énergie, la forme du signal est la même pour les protons et ions (contrairement à ce qui est observé à basse énergie)



# Mesures à haute énergie au GSI

- Mesures de quenching réalisées au GSI pour des ions relativistes
- $\frac{dL}{dE} > 1$ : "antiquenching", pour un même dépôt d'énergie les ions génèrent plus de lumière que les protons

  - fi Itrage de la composante lente du signal par l'électronique ? à haute énergie, la forme du signal est la même pour les protons et ions (contrairement à ce qui est observé à basse énergie)

- utilisation des mêmes détecteurs et de techniques semblables
- + mesures GANIL complémentaires aux mesures GSI
- les données GSI s'inscrivent dans la tendance des mesures GANIL



# Mesures à haute énergie au GSI

- Mesures de quenching réalisées au GSI pour des ions relativistes
- $\frac{dL}{dE} > 1$ : "antiquenching", pour un même dépôt d'énergie les ions génèrent plus de lumière que les protons
  - fi ltrage de la composante lente du signal par l'électronique ?
  - à haute énergie, la forme du signal est la même pour les protons et ions (contrairement à ce qui est observé à basse énergie)
- ⇒ l'antiquenching et la similitude des signaux proton/ion restent incompris
- ⇒ les mesures réalisées sont valables pour l'étalonnage en vol

- utilisation des mêmes détecteurs et de techniques semblables
- mesures GANIL complémentaires aux mesures GSI
- + les données GSI s'inscrivent dans la tendance des mesures GANIL



- Astronomie  $\gamma$
- GLAST
- Etude du quenching de la scintillation du CsI(TI)
- Qualification des modèles de cascades hadroniques disponibles dans GEANT4
  - Cascades hadroniques et Simulations
  - Observables
  - Etude basse énergie (faisceau-test GSI)
  - Etude haute énergie (faisceau-test CERN)

## **Cascades Hadroniques**



# **Cascades Hadroniques**



- cascade intranucléaire : processus rapides, interaction nucléaire forte et problème à n-corps
- pré-équilibre, fi ssion, évaporation
   processus lents, importance du
   champ nucléaire moyen
- ⇒ Larges gammes d'énergie et de processus physiques complexes
- $\Rightarrow$  Simuler les cascades hadroniques est difficile

## **Cascades hadroniques :** Simulations

- Modèles disponibles dans GEANT4 v6.2p02
  - Modèle LHEP (GHEISHA): 100MeV < E < 100GeV
    - seule la 1ère interaction est calculé, modèle paramètré
  - Modèle de cascade intranucléaire de Bertini : 100MeV < E < 10GeV
    - noyau=sphère centrale + 2 coquilles sphériques
    - pré-équilibre=paramétrisation de Kalbach
    - fi ssion/évaporation=formalisme de Weisskopf et Ewing
  - Modèle de cascade binaire : 100MeV < E < 10GeV
    - noyau en 3D(Woods-Saxon), résolution numérique de l'éq. du mouvement
  - Modèles hautes énergies QGS : 20GeV < E < 100GeV

## **Cascades Hadroniques :** Observables

- **Dépôt d'énergie par couche :**  $E_1, E_2...E_8$
- Multiplicité par couche :  $M_1, M_2...M_8$
- Dépôt total d'énergie dans tout le calorimètre

$$\Rightarrow E_{Totale} = \sum_{i=1}^{i=8} (E_i)$$

Multiplicité totale

$$\Rightarrow M_{Totale} = \sum_{i=1}^{i=8} (M_i)$$

Dépôt maximum d'énergie dans une couche

$$\Rightarrow$$
 Emax =  $Max(E_1...E_8)$ 

Variance des dépôts d'énergie dans chaque couche

$$\Rightarrow$$
 variance =  $\sqrt{\frac{1}{8} \sum_{i=1}^{i=8} (E_i - \langle E \rangle)^2}$ 

## **Faisceau-test GSI**



- Etalonnage en muons cosmiques (NRL)
- Coupure 1 MIP couche 0
- $\Rightarrow$  coupure forte !!!



#### Dépôt d'énergie

#### Multiplicité



30 septembre 2005 - p.28/33





Energie et Multiplicité totales

30 septembre 2005 - p.28/33

Energie et Multiplicité totales





Conclusions basse énergie

- ⇒ Le modèle de Cascade Binaire est disqualifi é…par rapport à nos besoins.
- Le modèle de Bertini reproduit mieux les données que le modèle LHEP, en particulier les variables globales : Etotale, M<sub>totale</sub>, E<sub>Max</sub>, variance

# **Faisceau-test CERN**

		Ligne de faisceau	distances en cm
Donnée	es faisceau	$\longleftrightarrow \begin{array}{c} 300 & 10 \\ \longleftrightarrow \end{array} \begin{array}{c} 10 \\ \end{array} $	$\xrightarrow{2}$
Impulsion	Particules		
10 GeV/c	$e^{-}\left(\mu^{-},\pi^{-} ight)$	-±-イֈ{ֈ{	
20 GeV/c	$e^{-}\left(\mu^{-},\pi^{-} ight)$	P1P2 T1 T2	
20GeV/c	$\mu^{-}(e^{-},\pi^{-})$	Scintillateurs Trajectographe	Plomb C1 C2

plastiques

**Calorimètre** 

- 8 couches de 6 détecteurs
   Csl horizontaux
- amplifi cateurs muons/faisceau

#### Etalonnage

silicium

dépôt d'énergie des muons

Calorimètre

Csl

inter-étalonnage des amplifi cateurs par injection de charge

# **Faisceau-test CERN**

		Ligne de faisceau	8	distances en	cm	
Donnée	s faisceau	€ 300	$\rightarrow \stackrel{10}{\longleftrightarrow} \leftarrow$	150 	$\stackrel{2}{\longleftrightarrow}$	
Impulsion	Particules		11	ſ	T	
10GeV/c	$e^{-}\left(\mu^{-},\pi^{-} ight)$	-⊻00	┥╢┾╍			
20 GeV/c	$e^{-}\left(\mu^{-},\pi^{-}\right)$	P1P2	ГГ Т2			
20GeV/c	$\mu^- \left( e^-, \pi^-  ight)$	Scintillateurs T	raiectograph	Plomb		

plastiques

#### **Calorimètre**

- 8 couches de 6 détecteurs
   Csl horizontaux
- amplifi cateurs muons/faisceau

#### Etalonnage

silicium

- dépôt d'énergie des muons
- inter-étalonnage des amplifi cateurs par injection de charge

### **CERN** : Coupures



Identifi cation lepton/hadron

- coupure ajustée sur les simulations
- effi cace et robuste : reste 2% d'électrons

Trajectographe : sélection des trajectoires traversant proprement les détecteurs



### **CERN :** Etude à 20GeV/c

#### Dépôt d'énergie



#### Multiplicite Couche 0 MultCouche0 Entries 12658 Mean 0.5525 RMS 1.053 6 Multiplicite



2 3 4

1 2 3



Entries

Mean

RMS

4





#### **Multiplicité**

7000

6000

5000

4000

3000

2000

1000

5000

4000

3000

2000

1000

Multiplicite Couche 1

Multiplicite Couche 3

2 3 MultCouche1

6 Multiplicite

MultCouche3

5 6 Multiplicite

MultCouche5

Entries

Mean

5 6 7 Multiplicite

RMS

Entries

Mean

RMS

12658

0.8574

1.305

12658

1.417

1.472

12658

2.022

1.449

Entries

Mean

RMS

## **CERN :** Etude à 20GeV/c



30 septembre 2005 – p.32/33

### Le LAT : étalonnage et cascades hadroniques

#### Simulation des cascades hadroniques

- Energie incidente < 10GeV modèle de Bertini</p>
- Energie incidente > 10GeV modèle LHEP
- + la nouvelle campagne de faisceau-test prévu au CERN (PS et SPS) avec les modules de secours du LAT permettra une validation plus poussée de la simulation Monte-Carlo
- + élaboration des algorithmes d'identifi cation

#### Etude des effets de quenching dans le Csl(Tl)

- Mesure du quenching pour des ions de 0 à 73MeV/n et z=1-36
- Les mesures réalisées au GSI à haute énergie s'inscrivent dans la tendance des mesures à basse énergie réalisées au GANIL
- Les facteurs de quenching mesurés au GSI sont valables pour permettre l'étalonnage en vol des détecteurs CsI avec les ions lourds du rayonnement cosmique
- + Complèter l'élaboration de l'étalonnage en vol au niveau de la simulation (Monte-Carlo et analyse)