Étalonnage de la caméra de l'expérience H.E.S.S. II et observation du centre galactique au-delà de 30 GeV

Raphaël Chalmé-Calvet



sous la direction de Jean-Paul Tavernet

21 Octobre 2013



Étalonnage de HESS II et observation du Centre Galactique

1 Introduction : L'expérience H.E.S.S. et le Centre Galactique

2 Calibration des caméras de H.E.S.S.

3 Calibration par anneaux de muons

Introduction : L'expérience H.E.S.S. et le Centre Galactique

- H.E.S.S. : High Energy Stereoscopic System
- Étude du Centre Galactique

2 Calibration des caméras de H.E.S.S.

3 Calibration par anneaux de muons

- Les photons gamma de très hautes énergies (E > quelques GeV) interagissent avec l'atmosphère pour former une gerbe électromagnétique
- Les particules chargées de cette gerbe peuvent dépasser la vitesse de la lumière dans l'atmosphère : c_{air} = Cuide n_{air}

 \Rightarrow Émission d'un cône de lumière bleue en direction du sol (lumière Cherenkov)

• En étudiant cette lumière bleue, on peut reconstruire les paramètres du photon gamma incident (direction, énergie, ...)



4 D N 4 🗐 N 4 E N

Introduction Télescopes de H.E.S.S.



- 4 télescopes CT1/2/3/4 :
 - Monture : Davis-Cotton
 - Rayon : \sim 6.5 m
 - Longueur focale : 15 m
 - Surface des miroirs : 107 m²

- +1 télescope CT5 :
 - Monture : Parabolique
 - Rayon : \sim 15.5 m
 - Longueur focale : 36 m
 - Surface des miroirs : 600 m²

< 回 ト < 三 ト < 三 ト

Introduction Caméras de H.E.S.S.



- 4 caméras :
 - Champ de vue : 5°
 - 960 photomultiplicateurs (PM)
- Électronique rapide :



- +1 caméra :
 - Champ de vue : 3.1 °
 - 2048 photomultiplicateurs (PM)

Échantillonnage : 1 ns Fenêtre de lecture : 16 ns

Étalonnage de HESS II et observation du Centre Galactique

Introduction Étude du Centre Galactique

Le région du Centre Galactique est très dense en sources astrophysiques : restes de supernova, nébuleuses de pulsar, nuages moléculaires et un trou noir supermassif (10^6 M_{\odot})



Observation du Centre Galactique en radio avec VLA



Observation du Centre Galactique avec HESS (2006)

Introduction Étude du Centre Galactique

- Le but de cette étude sera d'obtenir le spectre du Centre Galactique entre 30 GeV et 10 TeV
 - Couverture en énergie avec le satellite Fermi
 - Recherche d'annihilation de matière noire dans une gamme d'energie quasi-inexplorée (10 GeV-100 GeV)



Raphaël Chalmé-Calvet

• Le but de cette étude sera d'obtenir le spectre du Centre Galactique entre 30 GeV et 10 TeV

- Couverture en énergie avec le satellite Fermi
- Recherche d'annihilation de matière noire dans une gamme d'energie quasi-inexplorée (10 GeV-100 GeV)
- Ce dont on a besoin :

Introduction

Étude du Centre Galactique

- Compréhension du nouvel instrument
- Étude des méthodes de reconstruction à basse énergie
- Étude des fonctions de réponse de l'instrument (acceptance, résolution en énergie...)



6 / 20

Raphaël Chalmé-Calvet

• Le but de cette étude sera d'obtenir le spectre du Centre Galactique entre 30 GeV et 10 TeV

- Couverture en énergie avec le satellite Fermi
- Recherche d'annihilation de matière noire dans une gamme d'energie quasi-inexplorée (10 GeV-100 GeV)
- Ce dont on a besoin :

Introduction

Étude du Centre Galactique

- Compréhension du nouvel instrument
- Étude des méthodes de reconstruction à basse énergie
- Étude des fonctions de réponse de l'instrument (acceptance, résolution en énergie...)
- Difficultés :
 - Discrimination gamma-hadron à basse énergie
 - Soustraction du spectre d'origine astrophysique



6 / 20

• Calibration électronique :

Besoin de connaître avec précision la conversion entre les pas d'ADC et photoelectrons (p.e.) pour chaque pixel des caméras.

• Calibration optique :

Besoin de connaître le pourcentage de pertes de photons Cherenkov dans les télescopes

 \Rightarrow Définition de l'échelle d'énergie

Introduction : L'expérience H.E.S.S. et le Centre Galactique

2 Calibration des caméras de H.E.S.S.

- Paramètres de calibration
- Gains
- Piédestaux et Flat-Field



Amplitude en p.e. pour les chaines de hauts et bas gain (A^{HG} et A^{LG}) en fonction de l'**amplitude en pas d'ADC** (ADC^{HG} et ADC^{LG}) :

$$A^{HG} = \frac{ADC^{HG} - P^{HG}}{\gamma_e^{ADC}} \times FF$$
$$A^{LG} = \frac{ADC^{LG} - P^{LG}}{\gamma_e^{ADC}} \times \frac{HG}{LG} \times FF$$

avec :

- γ_e^{ADC} : gain de la chaine de haut gain (en ADC/p.e.)
- P^{HG} and P^{LG} : position de la ligne de base en pas d'ADC (**piédestal**)
- $\frac{HG}{LG}$: ratio d'amplification du haut gain sur le bas gain
- FF : coefficient de flat-field

Détermination des gains

- Illumination des caméras (en moyenne 1 p.e.) en configuration nominale
- Haut gain γ_e^{ADC} extrait de la distribution du signal ajustée par cette somme de gaussiennes :

$$\mathcal{G}(x) = N \times \left(\frac{e^{-\mu}}{\sqrt{2\pi}\sigma_P} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-P}{\sigma_P}\right)^2\right] + \kappa \sum_{n=1}^{m \gg 1} \frac{\mu^n e^{-\mu}}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\gamma_e} n!} \exp\left[-\left(\frac{x-(P+n\gamma_e^{ADC})}{\sqrt{2n}\sigma_{\gamma_e}}\right)^2\right]\right)$$



Bas gain :

Le ratio $\frac{HG}{LG}$ est obtenu dans la gamme d'intensité où les 2 chaines sont linéaires (30 à 150 p.e.)

Piédestaux et Flat-Field

- **Piédestal** : pas d'ADC moyen en absence de lumière Cherenkov
- Déterminés aussi souvent que possible durant les runs d'observation (environ une fois par minute)

 \Rightarrow Considération des variations de température dans les caméras



Piédestaux et Flat-Field

- **Piédestal** : pas d'ADC moyen en absence de lumière Cherenkov
- Déterminés aussi souvent que possible durant les runs d'observation (environ une fois par minute)

 \Rightarrow Considération des variations de température dans les caméras

- Coefficients de Flat-Field : Correction de l'inhomogénéité entre les PMs
- Détermination : Illumination uniforme des caméras durant des runs spécifiques







Introduction : L'expérience H.E.S.S. et le Centre Galactique

Calibration des caméras de H.E.S.S.

3 Calibration par anneaux de muons

- Efficacité optique
- Reconstruction des anneaux de muon
- Application aux vraies données

Pourquoi étudier les muons?

Raphaël Chalmé-Calvet

Étalonnage de HESS II et observation du Centre Galactique

11 / 20

æ

- 4 個 5 - 4 三 5 - 4 三 5

Pourquoi étudier les muons?



Parce que ça fait des beaux ronds

Étalonnage de HESS II et observation du Centre Galactique

.∃ →

Pourquoi étudier les muons?

- L'étude des muons est le seul moyen de comprendre la perte de photons Cherenkov dans le détecteur
- Les miroirs de HESS peuvent observer les muons sur les 400 derniers mètres avant le sol (700 m pour CT5)
 - \Rightarrow IIs ne perdent que peu d'énergie sur cette distance
- En reconstruisant les paramètres des muons (énergie, impact...) on peut connaître le nombre de photons Cherenkov qu'ils ont émis
- Comparaison avec le nombre de photoelectrons dans la caméra :

\Rightarrow Efficacité optique du télescope

Définition de l'efficacité optique

- L'efficacité optique peut être divisée en plusieurs contributions :
 - Réflectivité des miroirs : $Re \sim 80\%$
 - Ombre de la caméra : Sh $\sim 10\%$
 - Efficacité de collection : Perte entre les miroirs et les PMs de la caméra : Co $\sim 70\%$
 - Efficacité quantique des PMs : QE $\sim 20\%$

\Rightarrow Efficacité optique :

Opt. eff. = Re \times (1-Sh) \times Co \times QE \sim 10%

Paramètres de reconstruction des anneaux

- Angle Cherenkov θ_c = rayon de l'anneau (dépend de l'énergie du muon : cos θ_c = ¹/_{βn})
- Paramètre d'impact ρ
- Angle d'incidence ξ entre la trajectoire du muon et l'axe optique
 = position du centre de l'anneau (x,y)
- Angle azimutal du maximum d'intensité de l'anneau ϕ
- Largeur de l'anneau σ considérée comme gaussienne
- Efficacité optique du télescope Ψ

Image de l'anneau de muon dans la caméra



- A 🖓

.∃ →

Image de l'anneau de muon dans la caméra



Raphaël Chalmé-Calvet

Étalonnage de HESS II et observation du Centre Galactique

14 / 20

3 ⊁ 3

Modèle d'anneau pour un miroir circulaire



Fig. 2. Geometry of emission for a muon falling outside (a) or inside (b) the mirror. ρ = impact parameter of the muon; R = radius of the mirror; ξ = angle of incidence; $\tilde{\theta}$ = Čerenkov angle of emission.

Rovero et al. (1996)

Nombre de photons par pixel : $\frac{d^4 N_i}{dr \, d\phi \, d\lambda \, d\theta} = \frac{\alpha}{2} \sin(2\theta_c) \frac{\psi(\lambda)}{\lambda^2} \frac{D(\phi) a(r, \lambda)}{\sqrt{2\pi} \sigma_{\rm T}(r, \theta_c)}$ $\times \exp\left(-\frac{(\theta - \theta_c)^2}{2\sigma_{\rm T}^2(r, \theta_c)}\right) \qquad (2)$

avec :

- $a(r, \lambda)$ le coefficient d'absorption estimé par Monte Carlo
- D(φ) la corde définie par l'intersection entre le plan du miroir et le plan de la trajectoire des photons

Modèle d'anneau pour un miroir circulaire



Fig. 2. Geometry of emission for a muon falling outside (a) or inside (b) the mirror. ρ = impact parameter of the muon; R = radius of the mirror; ξ = angle of incidence; $\tilde{\theta}$ = Čerenkov angle of emission.

Rovero et al. (1996)

Nombre de photons par pixel : $\frac{d^4 N_i}{dr \, d\phi \, d\lambda \, d\theta} = \frac{\alpha}{2} \sin(2\theta_c) \frac{\psi(\lambda)}{\lambda^2} \frac{D(\phi) a(r, \lambda)}{\sqrt{2\pi} \sigma_{\rm T}(r, \theta_c)}$ $\times \exp\left(-\frac{(\theta - \theta_c)^2}{2\sigma_{\rm T}^2(r, \theta_c)}\right) \qquad (2)$

"It can be shown that" (Vacanti et al.)

$$D(\phi) = 2R\sqrt{1 - (\rho/R)^2 \sin^2 \phi}$$
 if $\rho > R$

$$D(\phi) = R\left(\sqrt{1 - (
ho/R)^2 \sin \phi^2} + (
ho/R) \cos \phi
ight) \qquad ext{if }
ho \leq R$$

Raphaël Chalmé-Calvet

Une géométrie parabolique



- La modèle de miroir circulaire n'est plus adapté pour CT5
- Optimisation des coupures de sélection et de reconstruction des anneaux

Ajustement de muons dans un run réel





Étalonnage de HESS II et observation du Centre Galactique

4 A 1

Ajustement de muons dans un run réel







Raphaël Chalmé-Calvet

Étalonnage de HESS II et observation du Centre Galactique

17 / 20

Distribution de l'efficacité



18 / 20

Suivi de l'efficacité dans le temps





Raphaël Chalmé-Calvet

< 1[™] >

-

Conclusion

• Calibration de HESS II :

- La plupart des paramètres de calibration électronique sont bien compris
- La calibration des données de HESS II est toujours sous étude
- La calibration optique de CT5 donne de bons résultats

Conclusion

• Calibration de HESS II :

- La plupart des paramètres de calibration électronique sont bien compris
- La calibration des données de HESS II est toujours sous étude
- La calibration optique de CT5 donne de bons résultats

• Étude du Centre Galactique avec HESS II (perspectives) :

- Début de l'étude de la reconstruction gamma à basse énergie
- Obtenir un spectre entre 30 GeV et 10 TeV
- Recouvrement en énergie avec le satellite Fermi
- Rechercher un signal d'annihilation de matière noire dans une gamme d'énergie quasi-inexplorée (30 GeV - 100 GeV)

Backup

Raphaël Chalmé-Calvet

Étalonnage de HESS II et observation du Centre Galactique

æ

- 4 回 ト - 4 回 ト - 4 回 ト

Photons distribution at the ground from muon emission Simulations



20 GeV muons launched 1000 m above HESS

$$\frac{\mathrm{d}^{4}N_{i}}{\mathrm{d}r\,\mathrm{d}\phi\,\mathrm{d}\lambda\,\mathrm{d}\theta} = \frac{\alpha}{2}\,\sin(2\theta_{c})\frac{\psi(\lambda)}{\lambda^{2}}\frac{D(\phi)\,a(r,\lambda)}{\sqrt{2\pi}\,\sigma_{\mathrm{T}}(r,\theta_{c})} \times \exp\left(-\frac{(\theta-\theta_{c})^{2}}{2\sigma_{\mathrm{T}}^{2}(r,\theta_{c})}\right)$$
(2)

- The first difficulty is to take into consideration the absorption of the atmosphere in the muon ring model
- It depends of the emission depth of the considered particule
- We have to replace $\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{a(r,\lambda)}{\lambda^2} d\lambda$ in the model by the integral over a simulated photons distribution at the ground from muon emission (in yellow)

Calibration curve from MC muons



- Calibration curve is linear with wavelength
- Excepted starting from 270 nm where the quantum efficiency begins to be too high



- As the calibration is linear, we can choose any wavelength lower limit in the integral
- We choose to integrate from 270 to 700 nm to not be annoyed by abosption

From muon efficiency to gamma efficiency

Cerenkov photons distributions for muons and gammas



- For gammas, the UV photons are largely absorbed by the 10 km atmosphere
- Due to this effect, gamma efficiency is different from muon one

Muon simulations with Kaskade

- 30 000 muons launched 1000 m above CT5 :
 - Impact between 0 and 22 m
 - $\bullet\,$ Incidence angle between 0 and 1.5 $^\circ\,$
 - Energy between 6 and 20 GeV
 - Multiple scattering

Muon simulations with Kaskade

- 30 000 muons launched 1000 m above CT5 :
 - Impact between 0 and 22 m
 - $\bullet\,$ Incidence angle between 0 and 1.5 $^\circ\,$
 - Energy between 6 and 20 GeV
 - Multiple scattering







Muon simulations with Kaskade

- 30 000 muons launched 1000 m above CT5 :
 - Impact between 0 and 22 m
 - $\bullet\,$ Incidence angle between 0 and 1.5 $^\circ\,$
 - Energy between 6 and 20 GeV
 - Multiple scattering



Raphaël Chalmé-Calvet

Étalonnage de HESS II et observation du Centre Galactique

25 / 20

First reconstruction



• Efficiency distribution not symmetric and with a too large width

Impact parameter reconstruction



Impact parameter systematically underestimated above 12 m

 \Rightarrow Two populations of efficiency

First cut

Cut on the impact parameter



Other cuts Number of fitted pixels and ring radius



• Efficiency non-symmetric for small Npix and small ring radius

 \Rightarrow additional cuts :

- Number of pixels in the fit : Npix > 100
- Ring radius : $\theta > 17 \text{ mrad}$

Final result



• Efficiency is finally symmetric

- With these 3 cuts the number of muons decreases from 2403 to 275 muons :
 - \Rightarrow About 9 times less muons

< 4 P ►

3

Impact parameter reconstruction



Impact parameter is well reconstructed