

Détecter l'invisible : les rayons cosmiques avec une caméra CCD



D'où vient cette idée ?



- en observant la Lune !



- Impact lunaire ou rayon cosmique ?

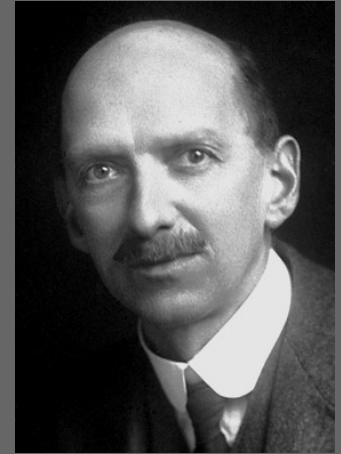
Extrait d'une image de 2h30 de pose

- $P_{RC}=0.220$ et $P_{impact}=0.012$

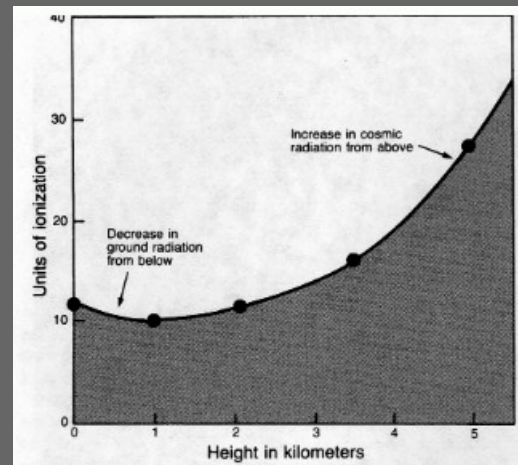
- → Il est plus probable que l'observation était un rayon cosmique

Un peu d'histoire ...

- Première observation en 1900 par le physicien Charles Thomson → découverte que l'atmosphère est toujours ionisée mais origine terrestre supposée
- 1^{ère} chambre à brouillard



- En 1912, Victor Franz Hess prouve que l'origine de cette ionisation est cosmique grâce à des ballons sonde. Il obtiendra le Prix Nobel de Physique en 1936



- En 1938, Pierre Auger découvre les gerbes atmosphériques grâce à des détecteurs dans les Alpes et estima l'énergie de ces particules à 10^{15} eV(*) !

(*) $E_{\text{max}}(\text{LHV}) \sim 7 \cdot 10^{12} \text{ eV}$

10^{15} eV = énergie cinétique d'une abeille à pleine vitesse

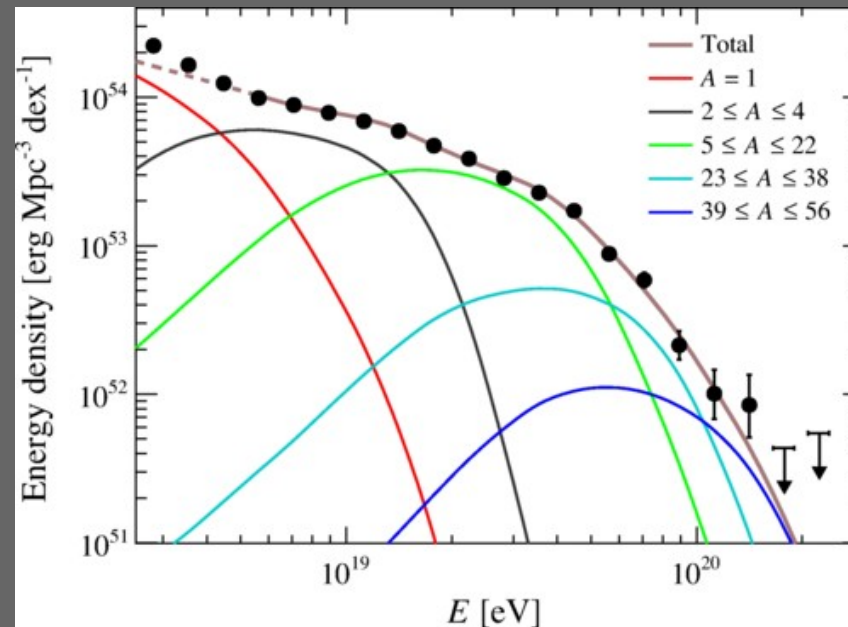
Un peu d'histoire ...

- L'observation des rayons cosmiques va permettre de découvrir de très nombreuses particules inconnues jusqu'alors

Particle	Year	Discoverer (Nobel Prize)	Method
e^-	1897	J.J. Thomson (1906)	Discharges in gases
p	1919	E. Rutherford	Natural radioactivity
n	1932	J. Chadwick (1935)	Natural radioactivity
e^+	1933	C.D. Anderson (1936)	Cosmic Rays
$\mu^\pm$	1937	S. Neddermeyer	Cosmic Rays
$\pi^\pm$	1947	C.F. Powell (1950)	Cosmic Rays
$K^\pm$	1949	C.F. Powell (1950)	Cosmic Rays
π^0	1949	R. Bjorklund	Accelerator
K^0	1951	R. Armenteros	Cosmic Rays
Λ^0	1951	R. Armenteros	Cosmic Rays
Δ	1952	C.D. Anderson	Cosmic Rays
Ξ^-	1952	R. Armenteros	Cosmic Rays
$\Sigma^\pm$	1953	A. Bonetti	Cosmic Rays
p^-	1955	O. Chamberlain (1959) E. Segre' (1959)	Accelerators
anything else	>1955	various groups	Accelerators
ν oscillations	1998	SuperKamiokande	Cosmic Rays

C'est quoi un rayon cosmique ?

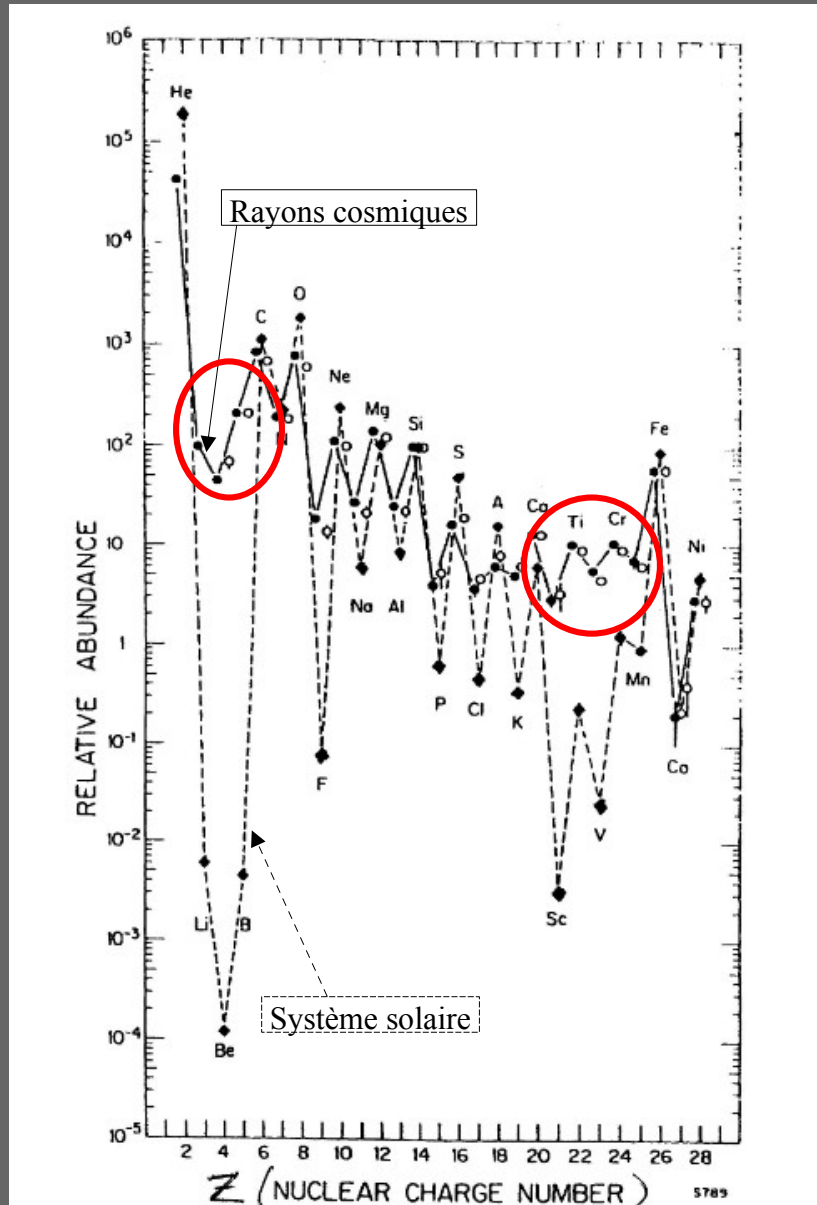
- Les rayons cosmiques sont en très grande majorité des particules chargées électriquement et très énergétiques qui viennent de l'espace et qui rentrent dans l'atmosphère terrestre.
- A plus près de 99 %, il s'agit de noyaux (90 % de protons et 9 % He), le 1 % restant sont des électrons



- A cela s'ajoute quelques particules neutres également : photons et neutrinos mais on est ici à la limite de ce que l'on peut vraiment appeler des rayons cosmiques

Les caractéristiques principales des RC hadroniques

Abondance relatives des éléments



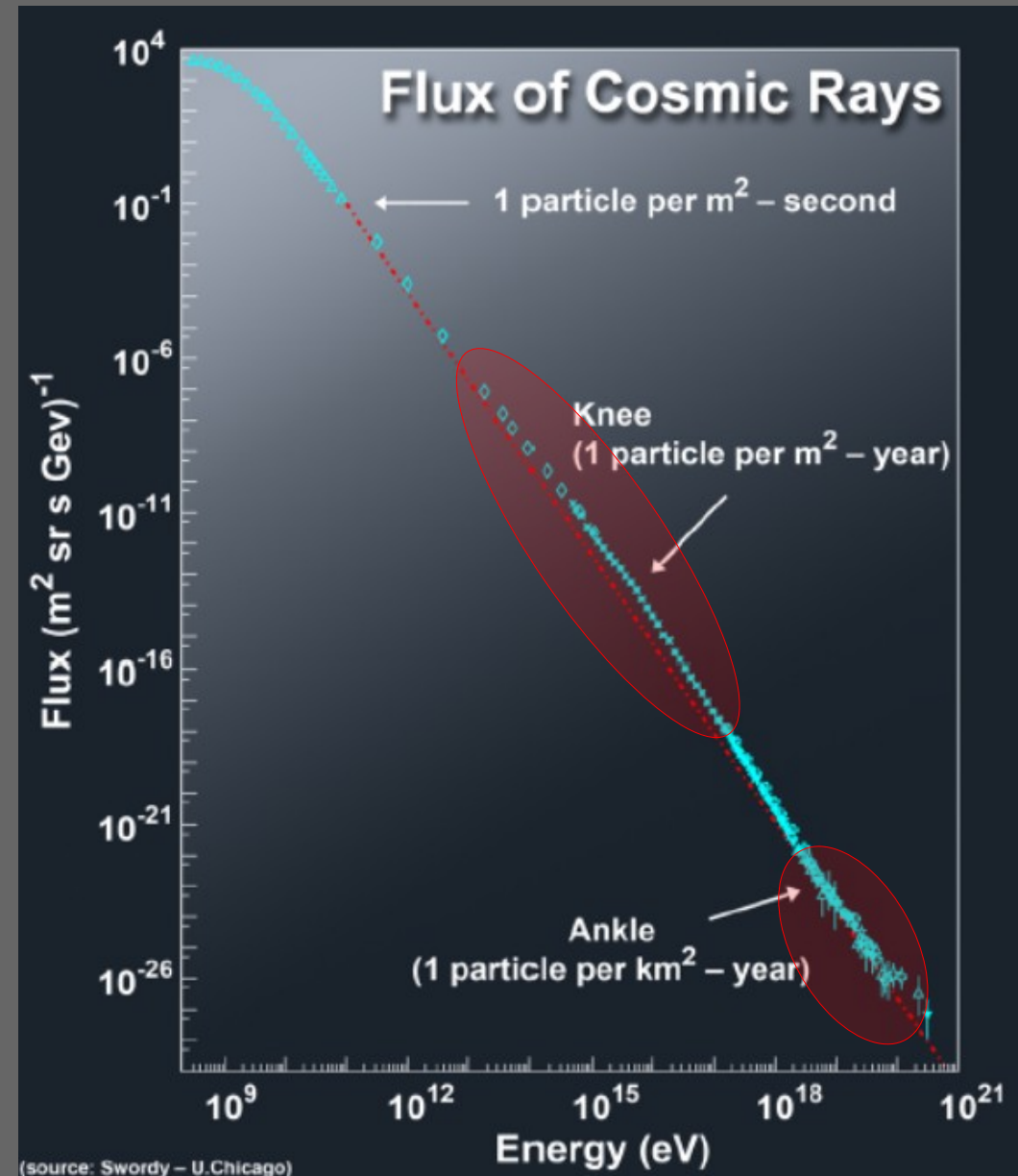
1. Composition isotopique proche de celle du système solaire
→ **origine issue de la nucléosynthèse stellaire**

2. Sur-abondance dans les RC du Li, Be, B, Sc, Ti, V, Cr et Mn due à des réactions de spallation des noyaux de C,N,O et Fe avec le milieu interstellaire
→ Une méthode pour estimer la distance parcourue par les RC

Les caractéristiques principales des RC hadroniques

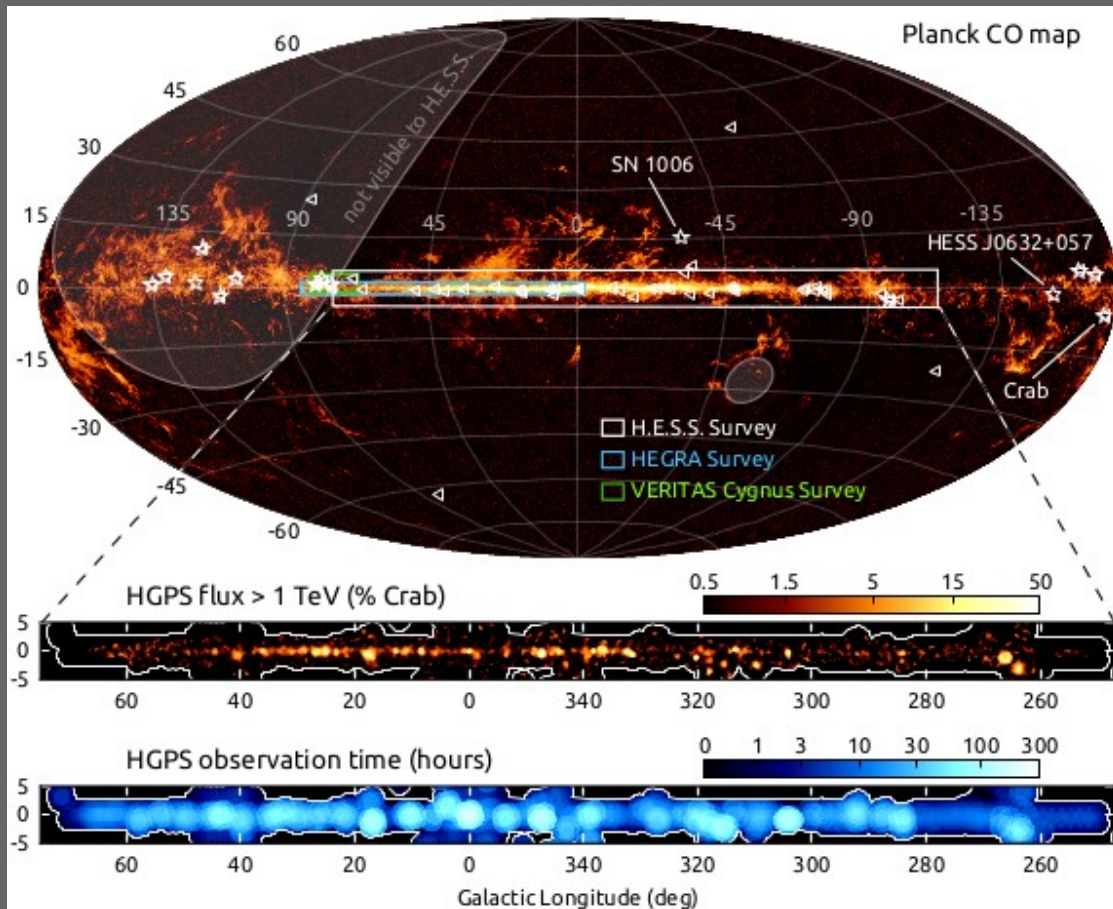
Spectre en énergie

- Les rayons cosmiques sont séparés en 3 groupes différents à partir de leur spectre :
- **1. sous le 10^9 eV :**
- protons énergétiques issus du soleil issu des éruptions solaires
- **2. jusqu'au « genou » : $< 10^{17}$ eV**
- Largement majoritaire en nombre
- → Origine galactique : accélération lors des explosions de SN notamment.
- **3. « La cheville » et au delà : $> 10^{17}$ eV**
- Le champ magnétique galactique ne peut pas retenir des particules aussi énergétiques



Les caractéristiques principales des RC

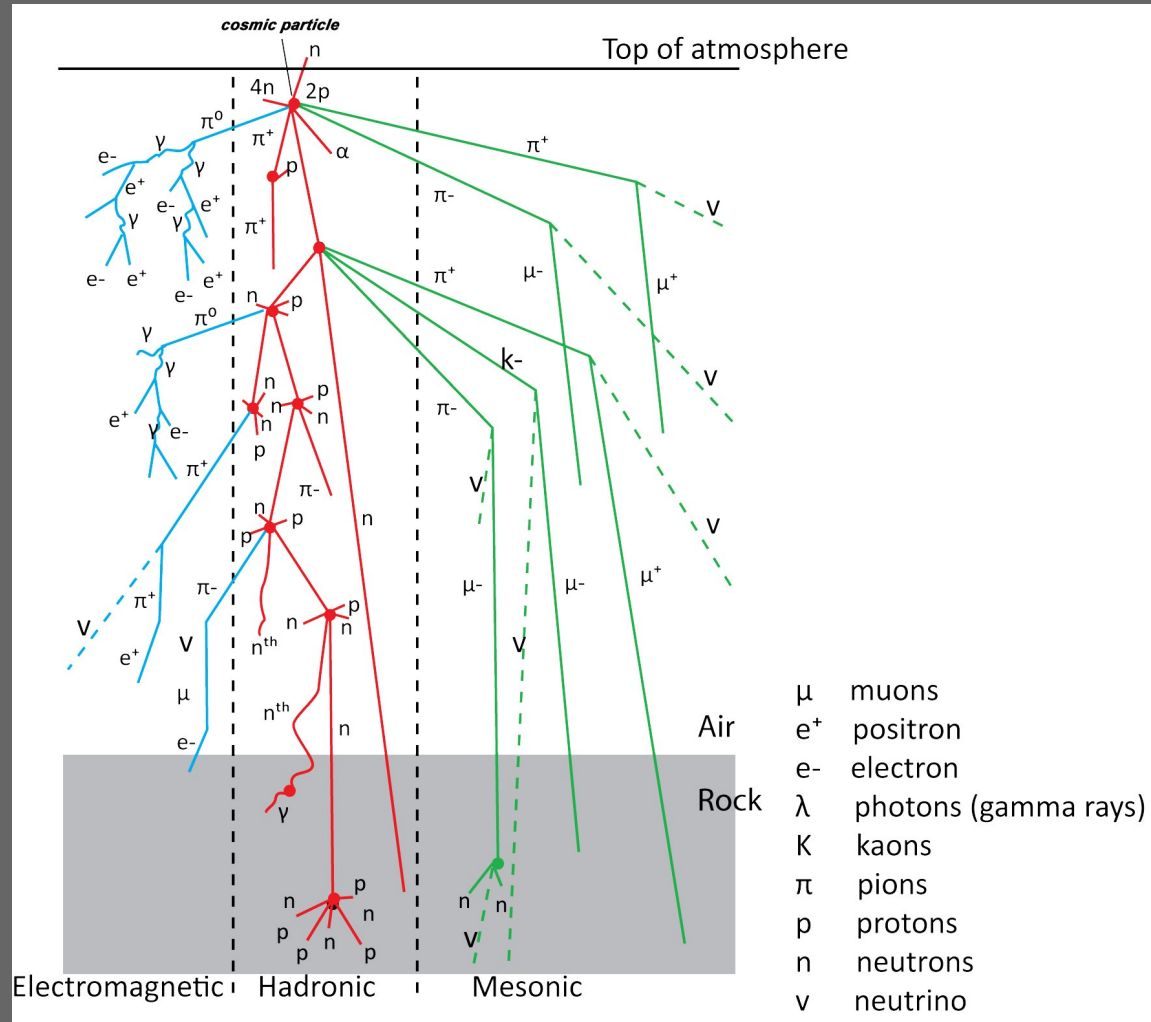
- Les rayons cosmiques hadroniques sont des particules chargées totalement ionisées
- → Forte interaction avec les champs magnétiques galactique, solaire, terrestre,...
- → Perte totale de l'information de la direction originelle



- Intérêt des « RC » neutres (gamma et neutrinos) :
- → possibilité de cartographier le ciel

Les RC sur Terre

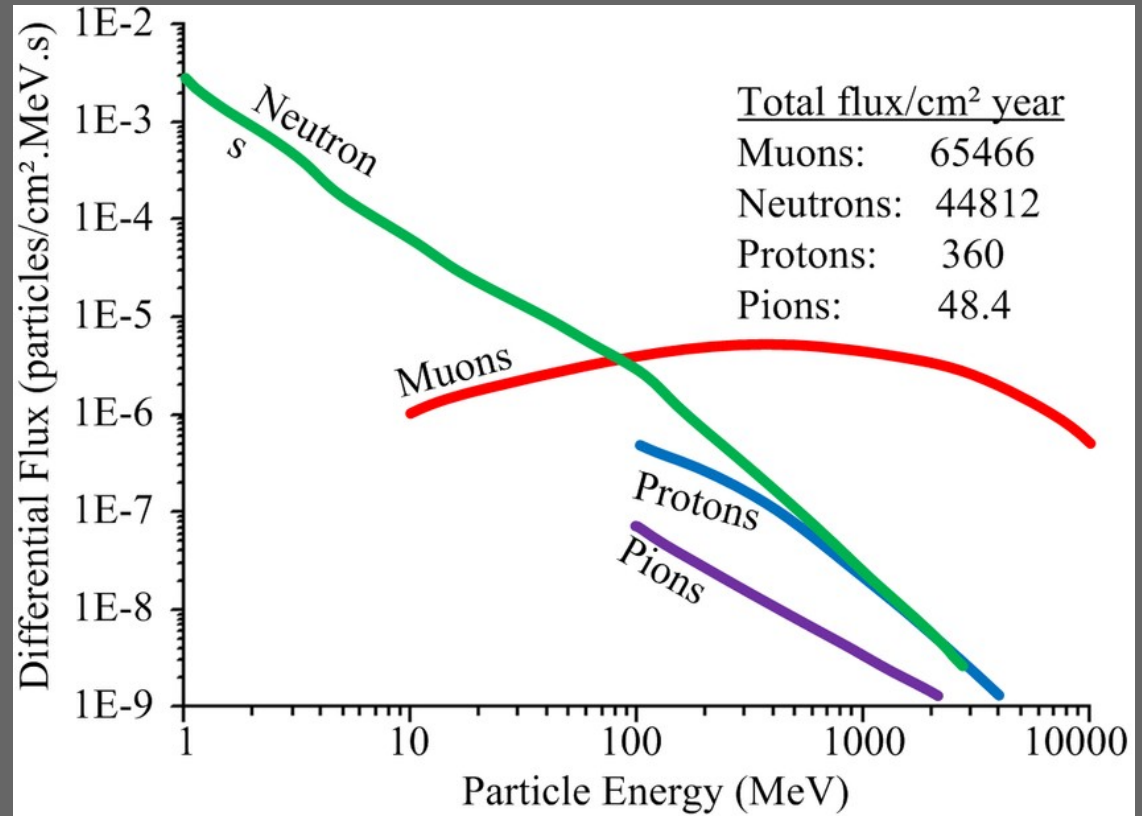
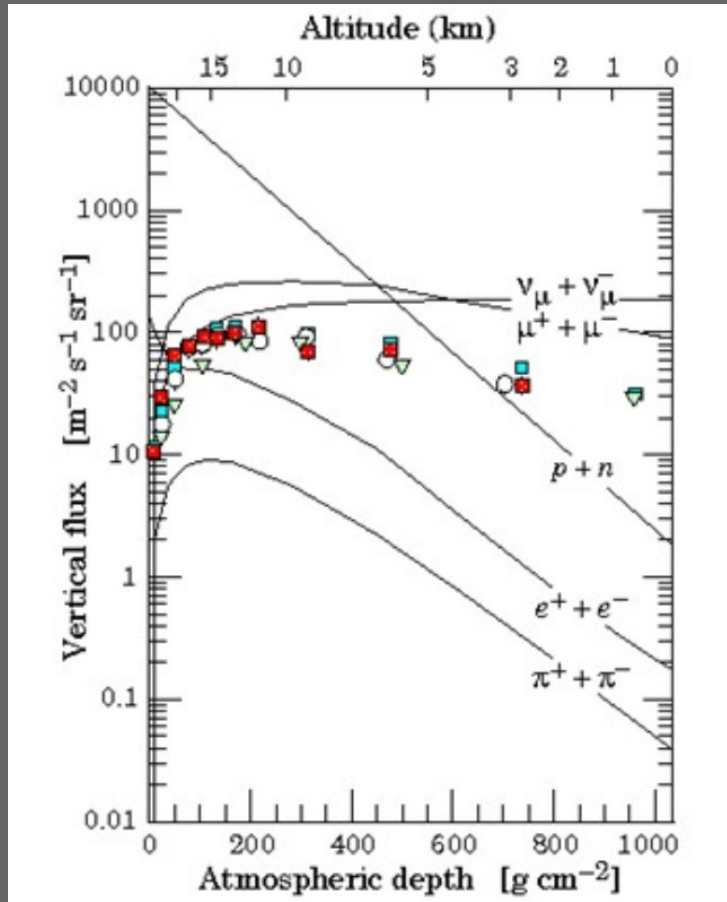
- Les rayons cosmiques interagissent dans l'atmosphère terrestre en explosant en une gerbe de particules différentes



- Brouillage encore des pistes sur la direction initiale du RC
- Nécessité de reconstruire la gerbe pour remonter au RC

Les RC sur Terre

- Nature des particules au niveau de la mer



- Au niveau de la mer : 99 % de muons et neutrinos
- 1 muon/ cm^2/min

- Energie des particules secondaires $\ll$ Energie des RC primaires

La détection des RC

- Plusieurs moyens de détection des RC sur Terre :

- - **la chambre à brouillard**

- visualisation des muons, aujourd'hui aspect plus pédagogique que vraiment scientifique

- - **la mesure par rayonnement Cerenkov**

- Soit en observant directement dans l'atmosphère

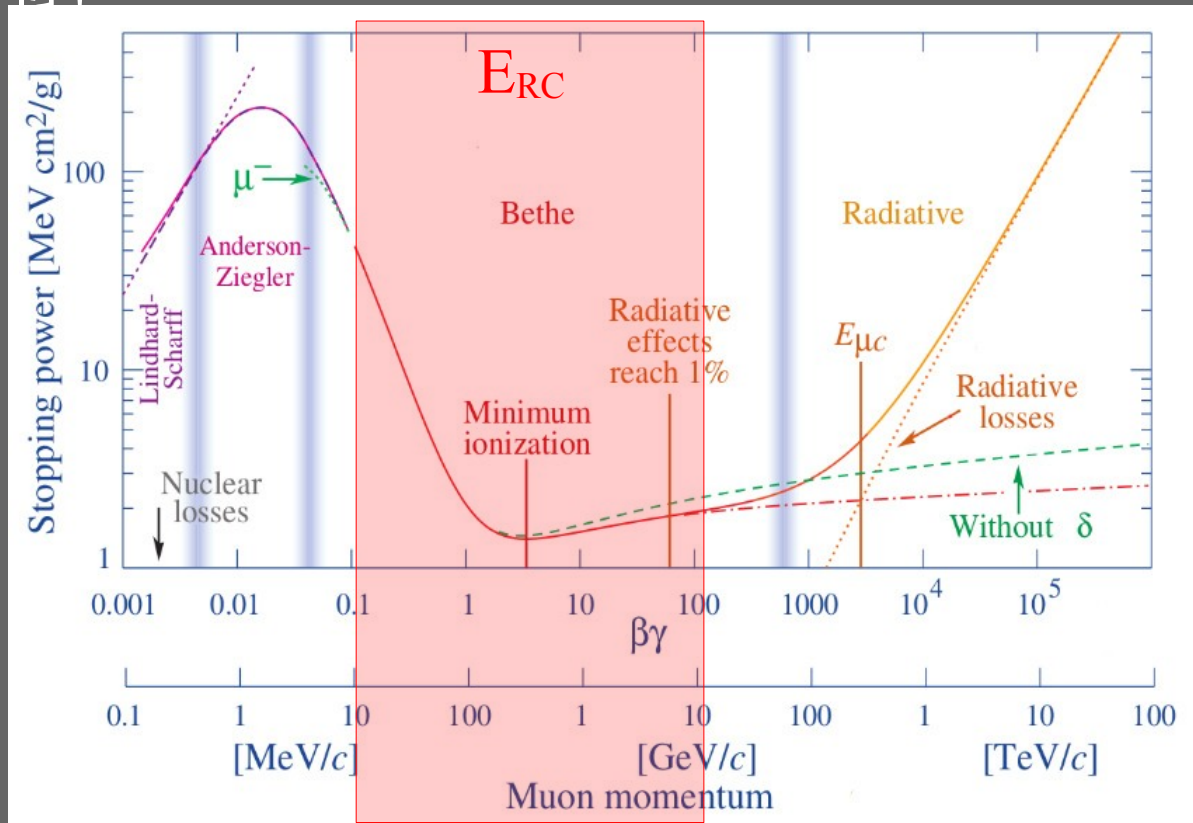


→ Quelque soit la méthode, il faut plusieurs détecteurs sur des km² pour reconstruire la gerbe

- - **Scintillateurs organiques**

La détection des RC chez les amateurs

- Les détecteurs au Silicium sont également utilisés pour détecter les particules chargées. Ça tombe bien : nos capteurs CCD sont à base de silicium !
- Mais attention le muon ne dépose pas toute son énergie dans le capteur, loin de là !



Pour un capteur de $15 \mu\text{m}$ d'épaisseur :

$\Delta E = 25 \text{ keV}$ pour 10 MeV

$\Delta E = 1.3 \text{ keV}$ pour 10 GeV

Nos capteurs sont évidemment aussi sensibles à la lumière et aux gammas
→ Image des RC à faire dans le noir total

L'observation des RC

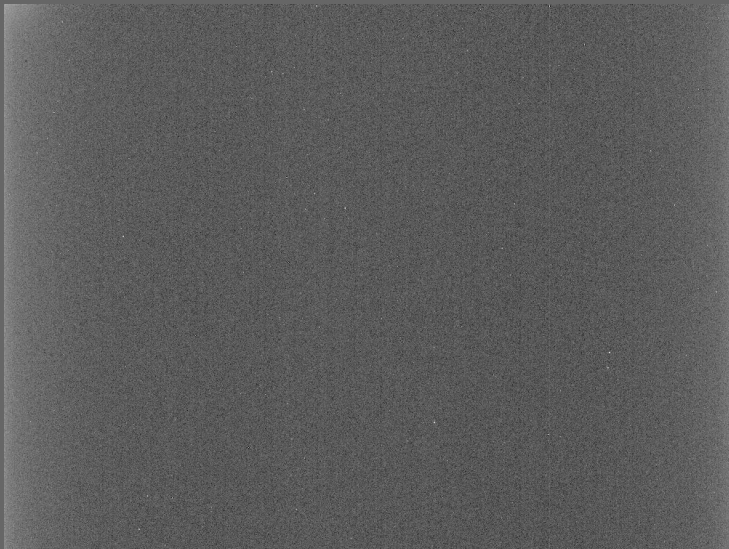
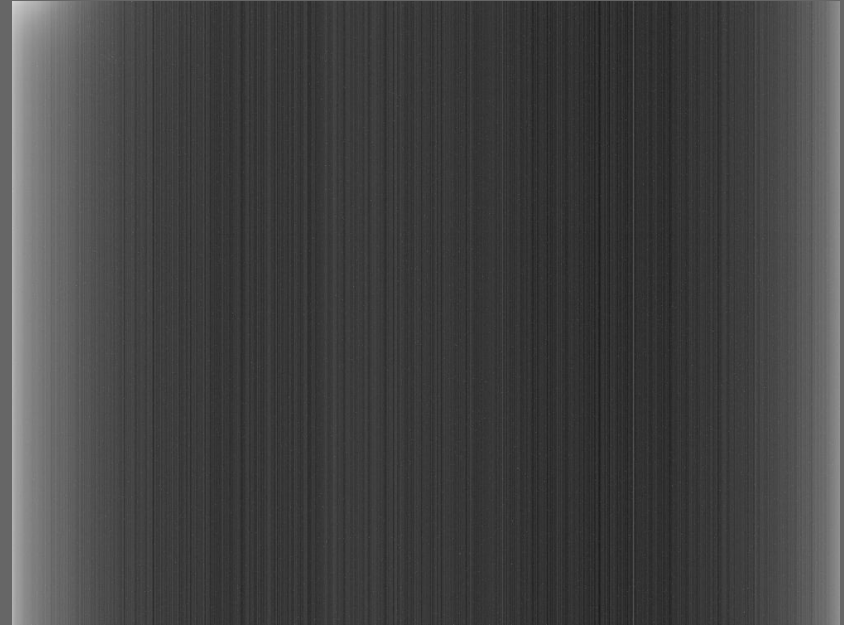
- Matériel : alta U8300 sur un simple trépied photo avec un cache noir opaque supplémentaire
- Caractéristiques alta U8300 :
 - Gain : 0.54 e-/ADU
 - Energie de création de pair : 1.12 eV
- 1ere étape : acquisition
 - - dark obturateur fermé
 - - refroidissement de la caméra à -30°C
 - - poses individuelles de 60 s
 - - orientation de la caméra sur l'axe N/S
 - - acquisition à différents angles de hauteur
 - - 24h d'acquisition par angle



Résultats : 7701 images du noir

L'observation des RC

- 2eme étape : le prétraitement
- Compositage médian des 7791 images sous pixinsight pour obtenir un dark maître
- Soustraction du dark maître à l'ensemble des 7791 images



L'observation des RC

- 3e étape : l'extraction des données
- Ecriture d'un script python pour :
 - détecter les RC dans toutes images individuelles
 - extraire les informations et caractéristiques des RC



- Informations accessibles et extraites :
 - Nombre de RC par image
 - horodatée et par angle du capteur
 - Position du RC sur le capteur (sans intérêt)
 - Sigma_min et Sigma_max de l'ellipse de détection
 - Allongement de l'ellipse de détection
 - Photon count du RC



L'observation des RC : les résultats

- 4e étape : analyse des données
- Ecriture d'un programme d'analyse sous root (CERN)
- Nombre total d'évènements détectés sur 8 jours : **31632**
- Morphologie des évènements détectés

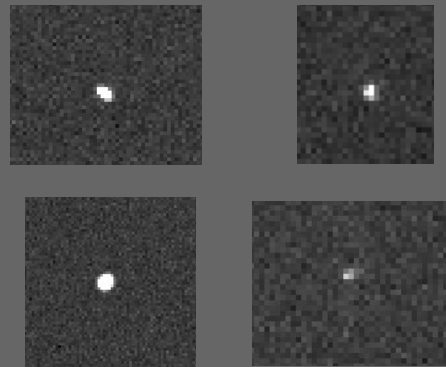


• « Track »



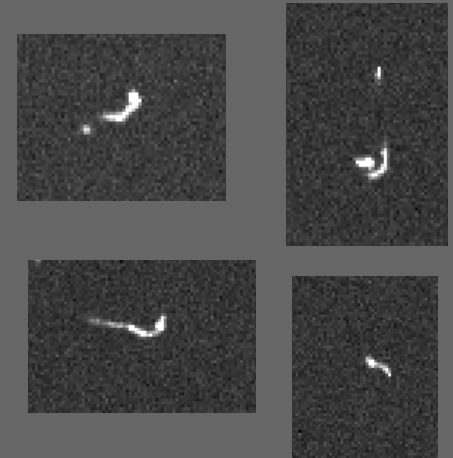
• Signature des muons

• « Spot »



• Signature de gamma, muons perpendiculaire ou alpha

• « Worm »

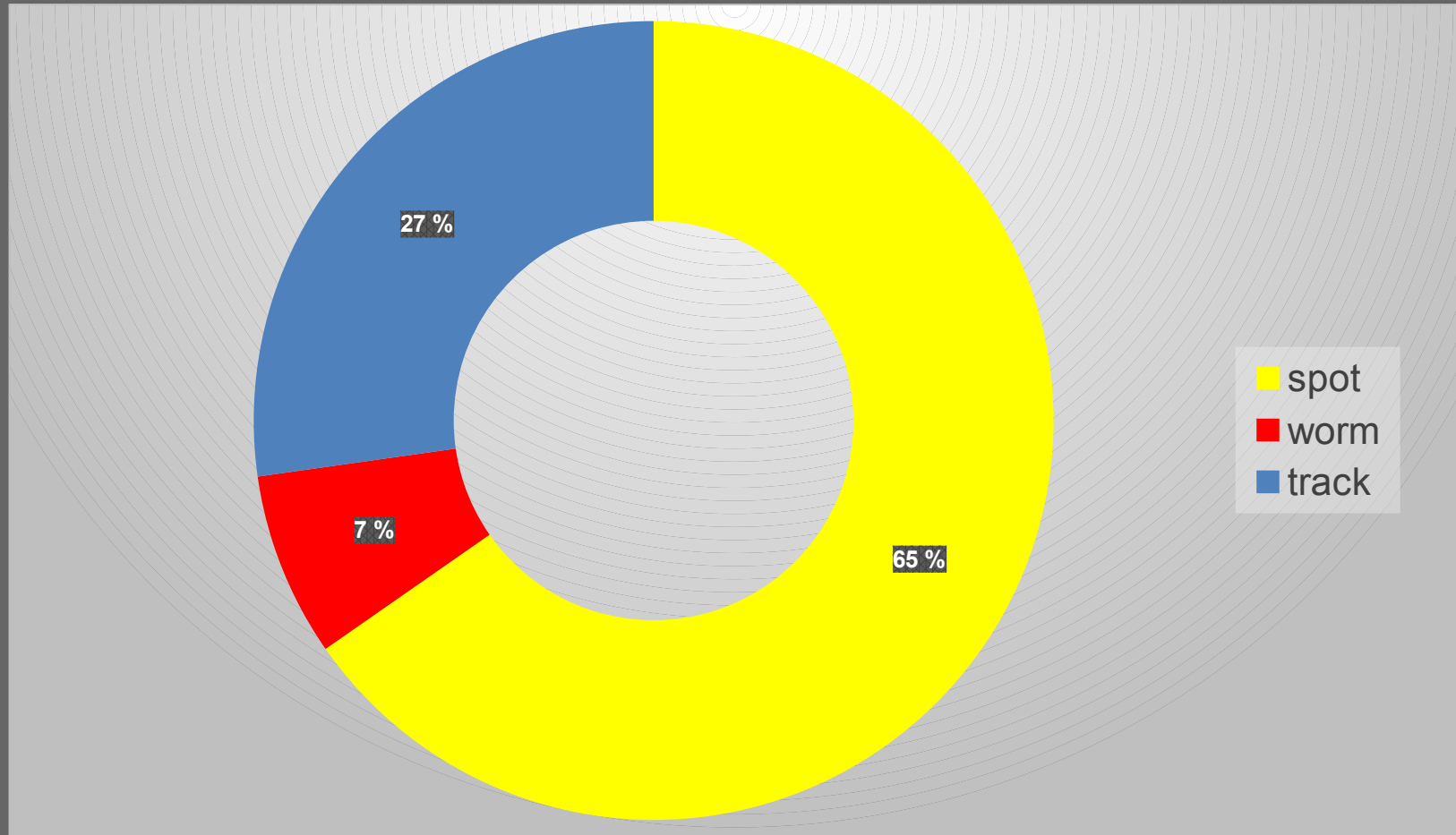


• Signature d'électrons issus de la radioactivité locale

- Ségrégation des évènements basées à la fois sur leur élongation (Sig_max/Sig_min) et sur la longueur de leur trace

L'observation des RC : les résultats

Distribution des particules



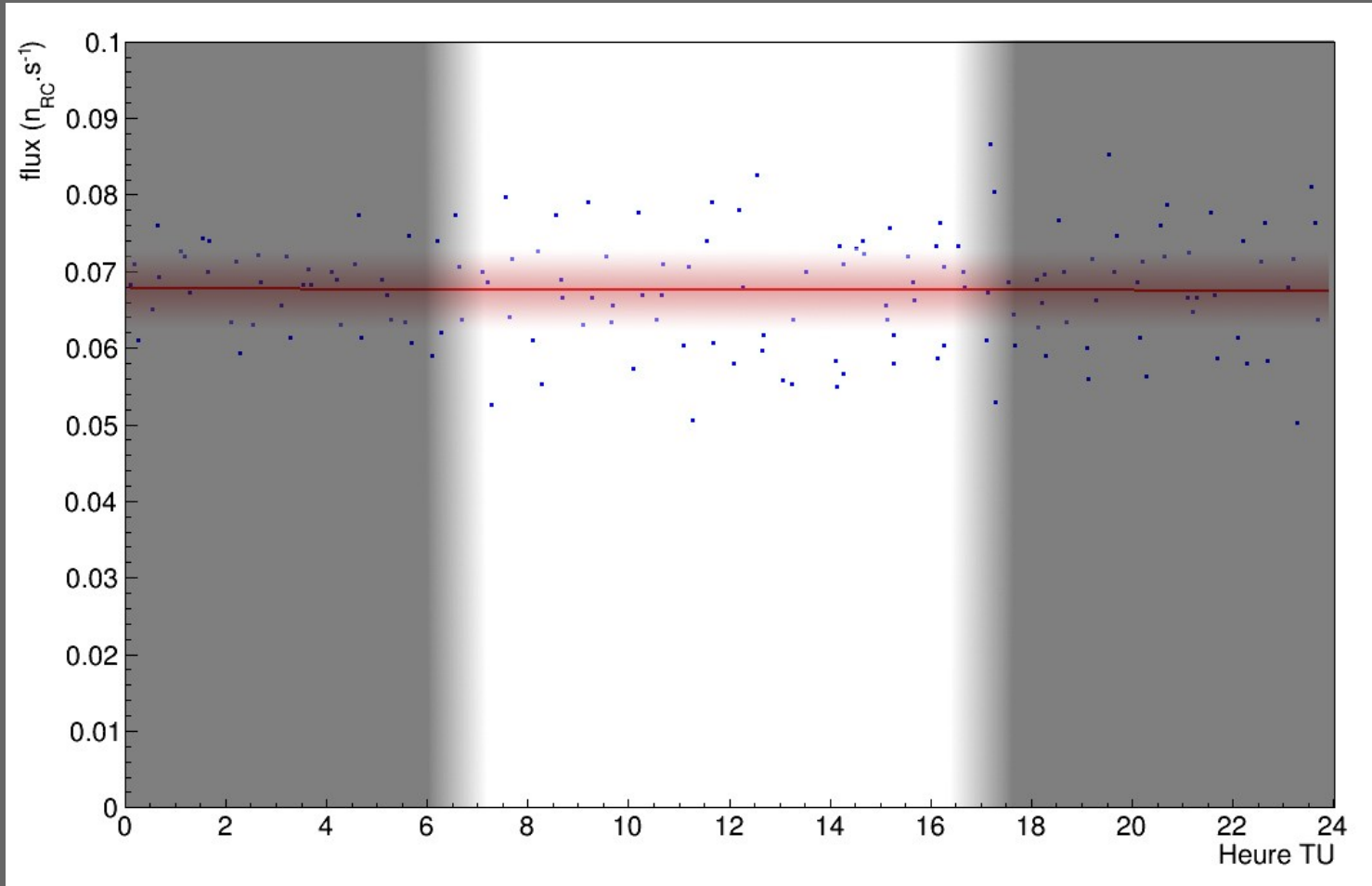
27% des détections seraient des muons à coup sûr

Grande majorité de détection « spot »

→ essai de discrimination des différents types d'évènements

L'observation des RC : les résultats

Distribution temporelle



Flux RC nuit :
 0.068 ± 0.013 (2σ)
evt/s

Flux RC jour :
 0.067 ± 0.016 (2σ)
evt/s

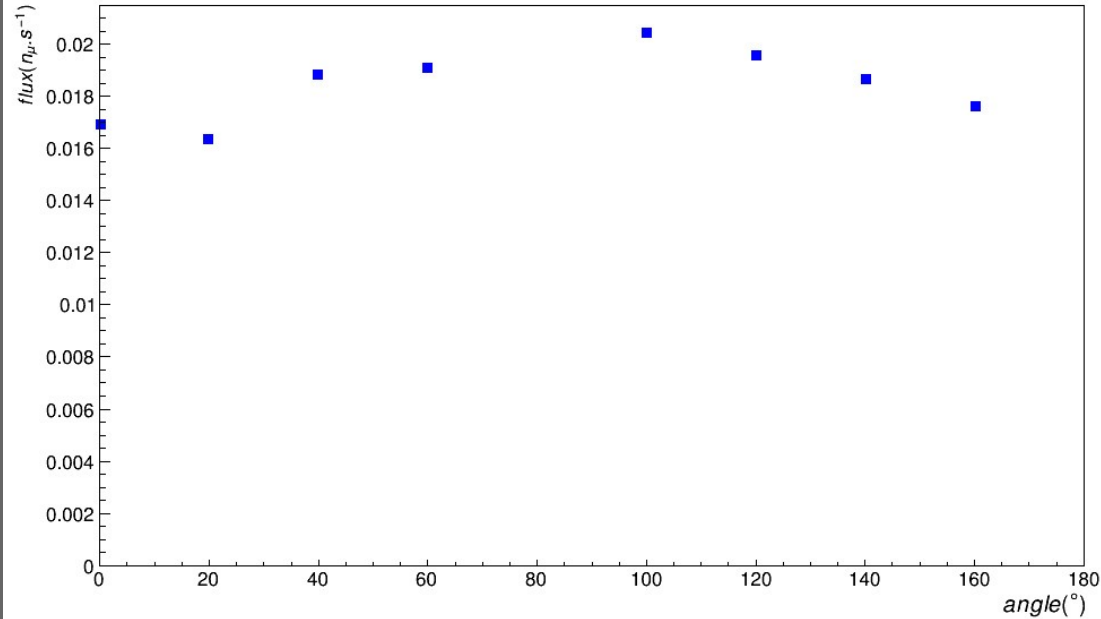
Résultat identique quelque soit le type d'évènements et notamment pour les muons

Pas d'effet de la présence ou non du soleil : Détection isotrope sur le ciel

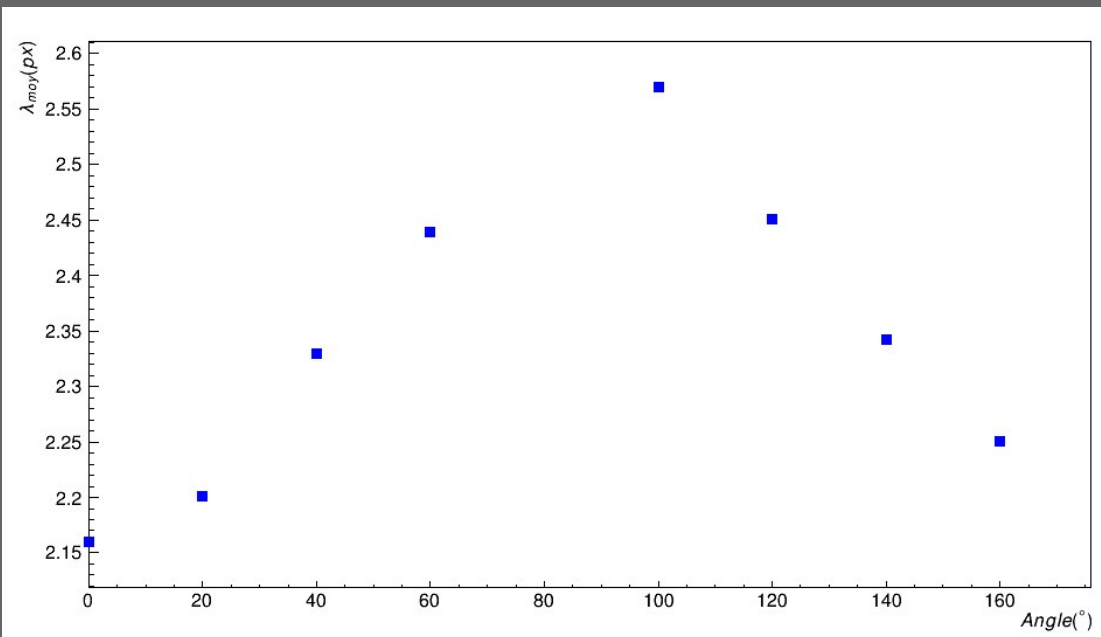
→ Détection de gerbe de RC pour des RC > 1 GeV

L'observation des RC : les « track »

Analyse en fonction de l'angle de la caméra



1. Flux presque constant
 - diminution de la surface apparente
 - augmentation de la détectivité avec l'augmentation de l'épaisseur apparente de Silicium
 - les « spot » se transforment en « track »

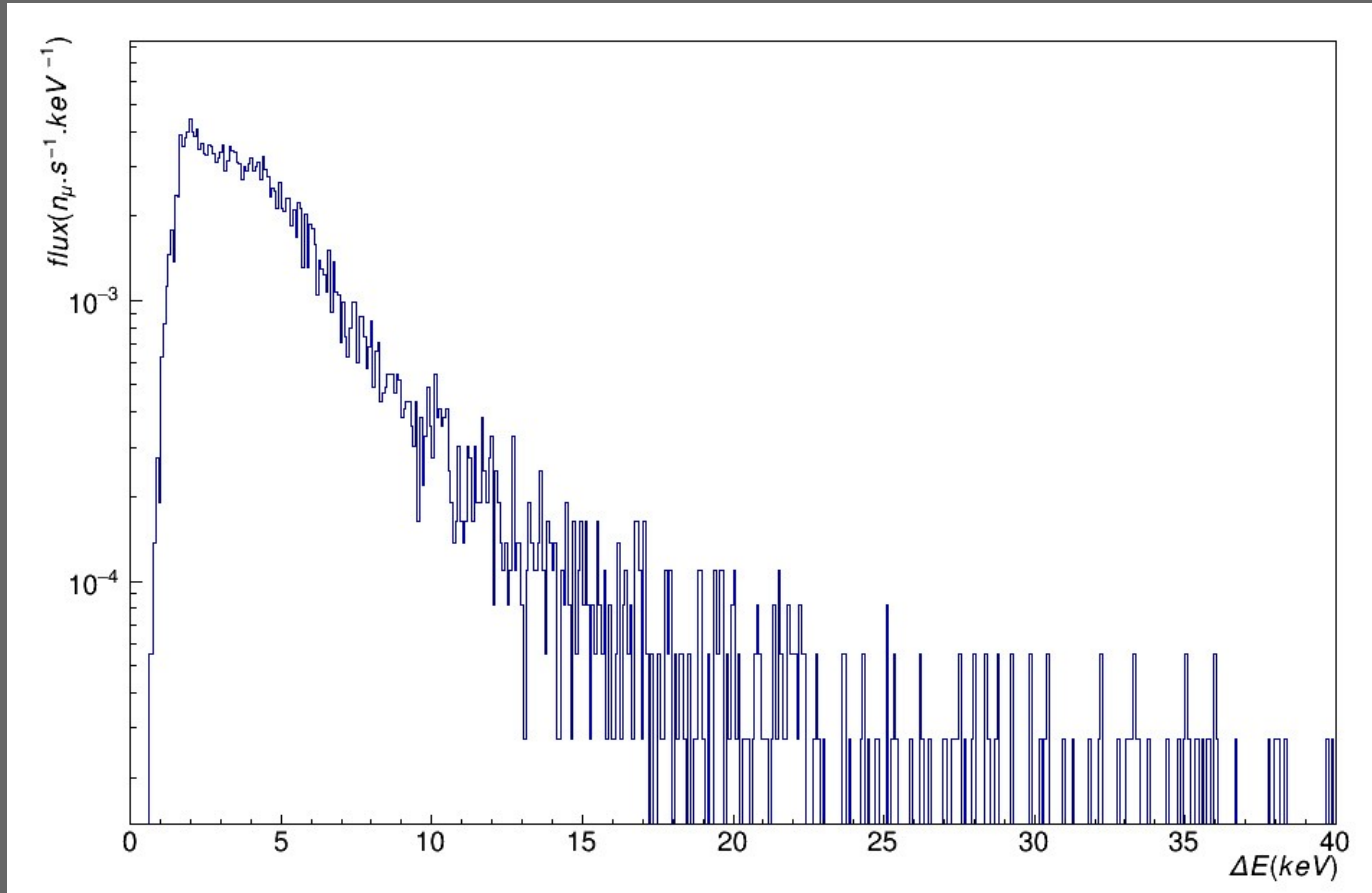


2. Ellongation moyenne croissante avec l'augmentation de l'angle de la caméra $\rightarrow$ maximale avec la caméra à 90°

$\rightarrow$ Trajectoire des particules « track » venant du ciel

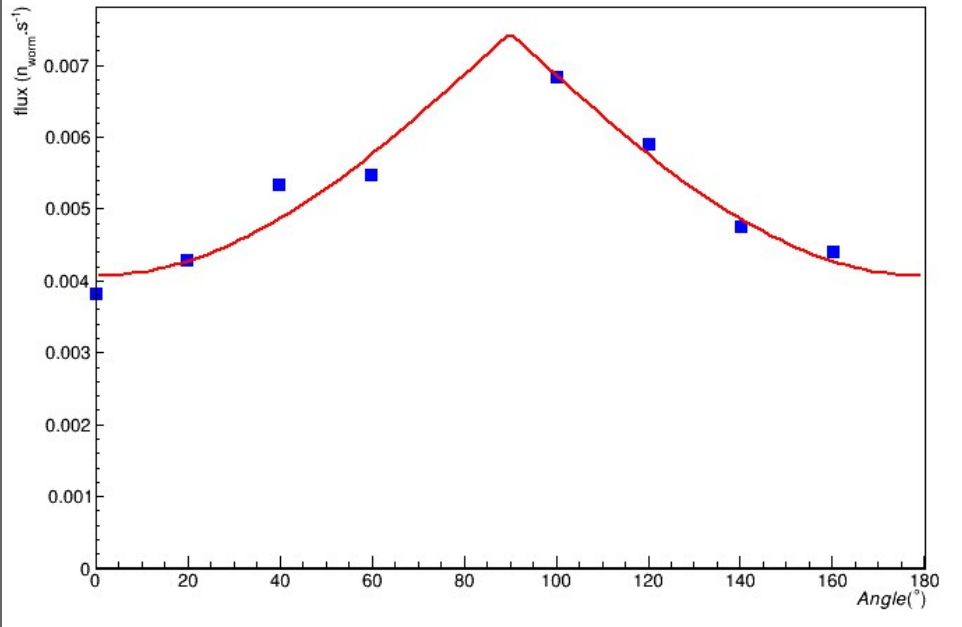
L'observation des RC : les « track »

Extraction de l'énergie déposée



1. Gamme d'énergie déposée conforme à l'attendue pour les muons cosmiques (entre 1.3 keV et 30 keV)
2. Maximum de flux pour un faible dépôt d'énergie → Maximum de flux de muons entre 100 MeV et 10 GeV

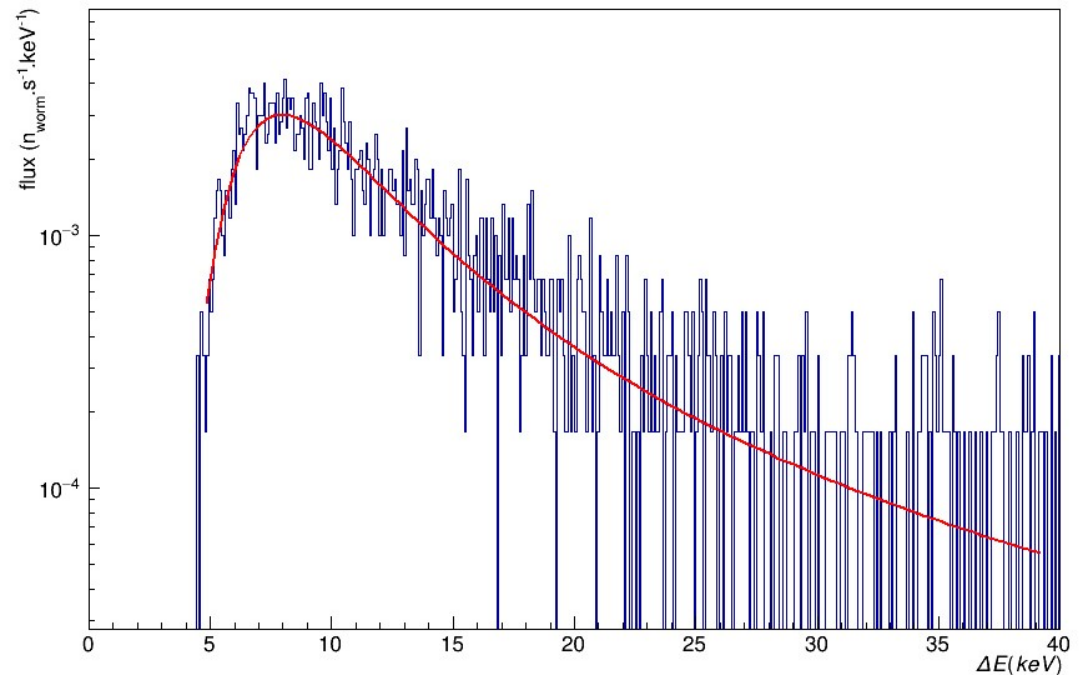
L'observation des RC : les « worm »



Flux des « worm » suit une loi en $1/\cosinus$ avec un flux maximum avec une caméra à 90°
→ Origine stellaire peu probable

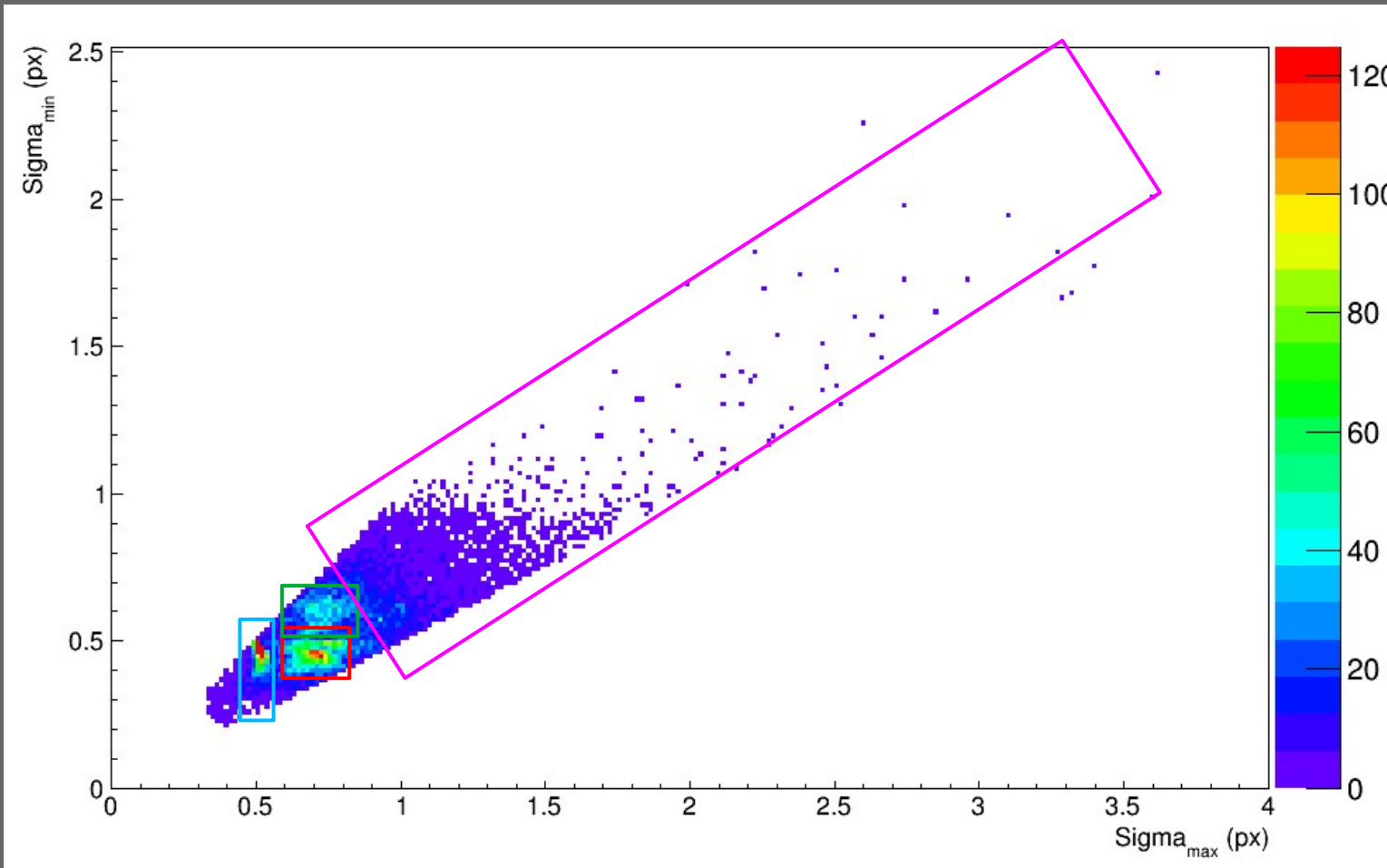
Spectre très différent des muons :

- Seuil en énergie
- Allure totalement différente



L'observation des RC : les « spot »

Discrimination des événements « spot »



4^e groupe :
- signal plus ou moins
circulaire
- signal étalé
Alpha ?

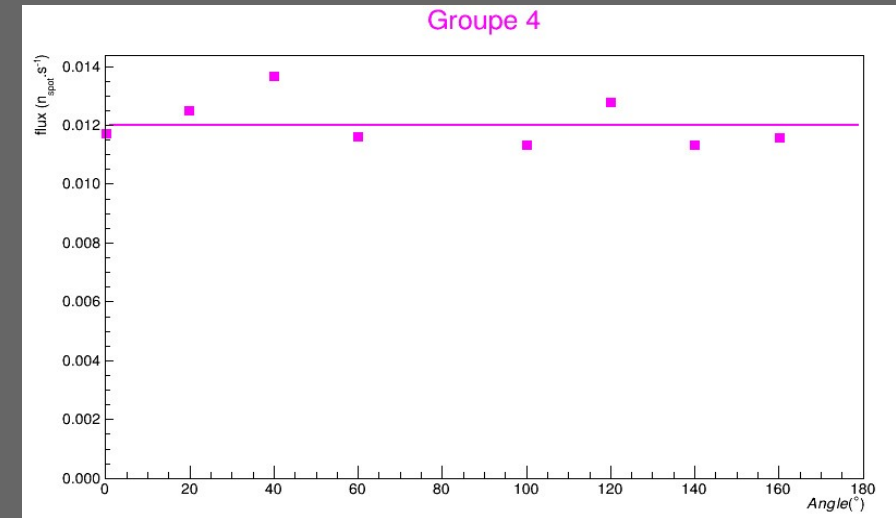
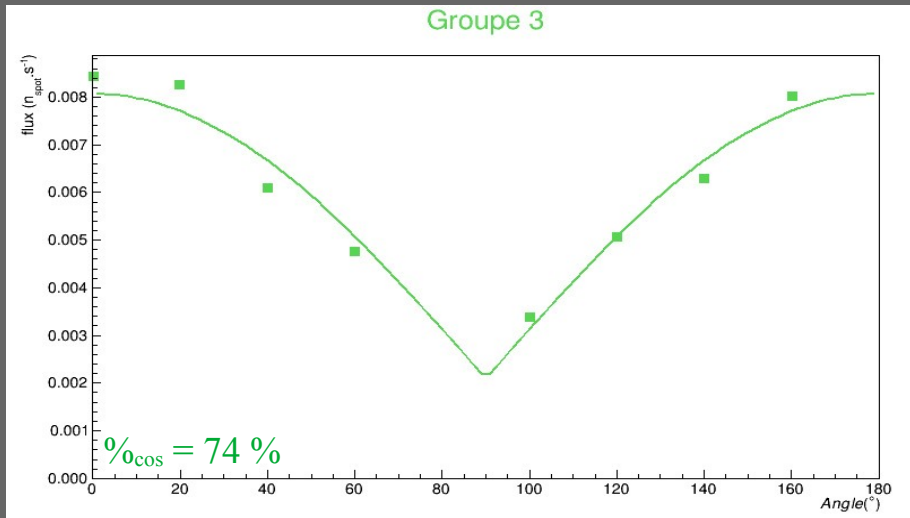
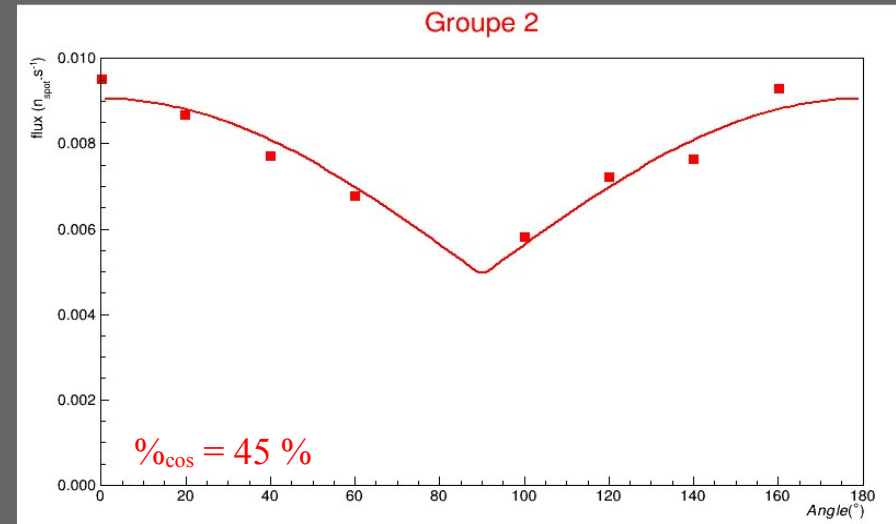
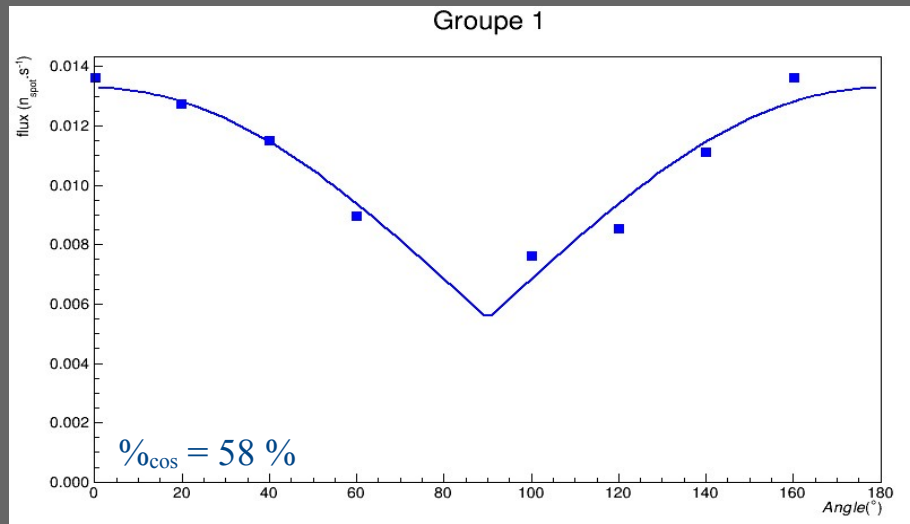
1^{er} groupe :
- signal quasi circulaire
- signal sur très peu de pixel

2^e groupe :
- signal moins circulaire
- signal plus étalé
Muons ?

3^e groupe :
- signal quasi circulaire
- signal plus étalé

L'observation des RC : les « spot »

Distribution en angle

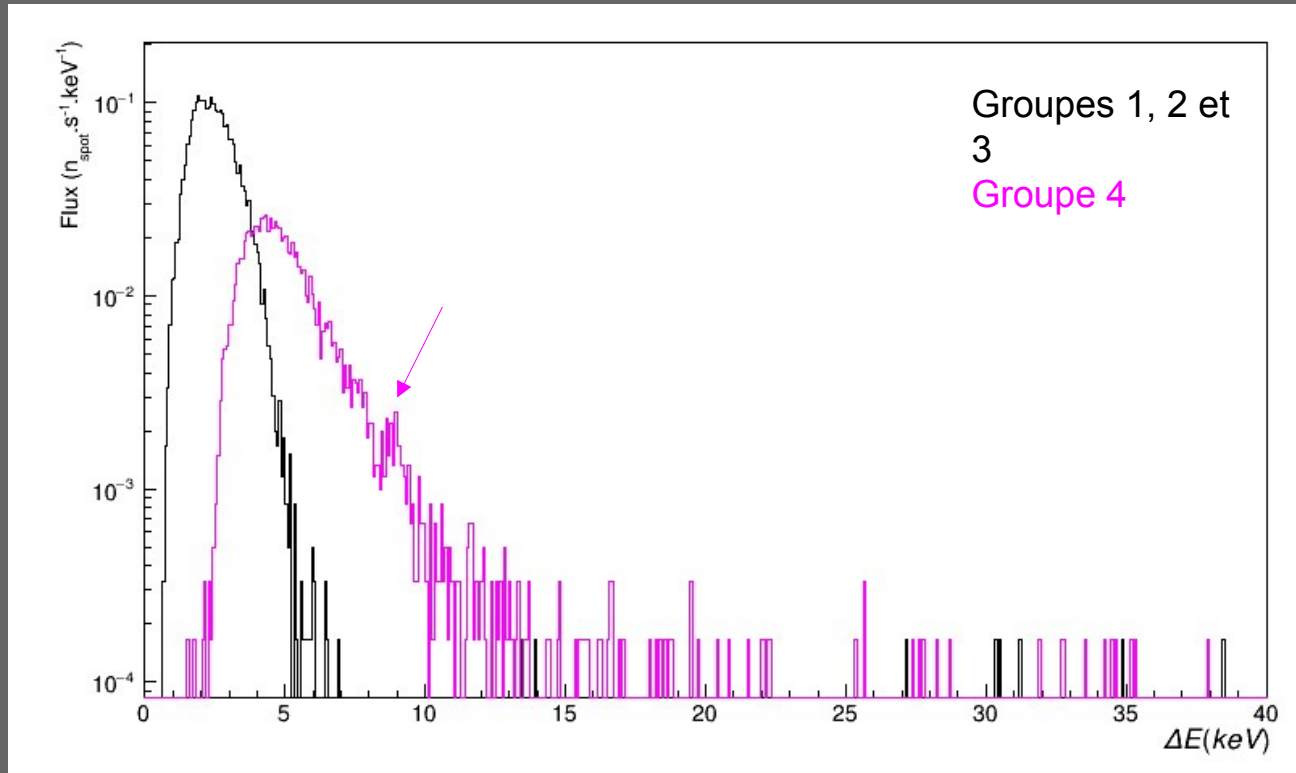


La distribution angulaire des groupes 1, 2 et 3 sont marqués de façon plus ou moins forte par une loi en cosinus → flux de particule venant du ciel

La distribution angulaire du groupe 4 est uniforme : distribution isotrope → Confirmation d'un bruit de fond ambiant

L'observation des RC : les « spot »

Extraction de l'énergie déposée



Faible quantité d'énergie déposée par les spot des groupes 1, 2 et 3.

→ Spectre sans rapport avec celui des muons mais cela ne veut pas forcément dire que cela n'en est pas !

Spectre du groupe 4 à plus haute énergie déposée et présence potentielle d'un pic ?

L'observation des RC

Conclusion

- Détection avec certitude de particules non visibles avec une caméra CCD
- Mise en évidence de caractéristiques physiques des RC sans accélérateur de particule ni détecteur complexe
- Difficulté d'identification des particules avec certitude
- Encore de nombreuses zones d'ombre qui restent à explorer et/ou à confirmer

La suite

- 5e étape : Simulation
- Simuler le détecteur et les sources (RC, radioactivité naturelle) sous Geant4 pour les confronter aux résultats
- Continuer les observations étaler sur l'année : une heure par semaine ou par jour ?
- Augmenter la statistique de mesure par plus d'images
- Observer à différentes altitudes
- Beaucoup plus complexe : utiliser plusieurs caméras en même temps pour faire



Références

- « Particle Identification In Camera Image Sensors Using Computer Vision », Miles Winter et al., Astroparticle Physics, Juin 2018
- « Natural radiation events in CCD imagers at ground level », T Saad Saoud et al., HAL-01427855, Janvier 2017
- « Radiation events in astronomical CCD images », A.R. Smith et al., IS&T/SPIE's Electronic Imaging 2002, Janvier 2002
- « Observing Ultra-High Energy Cosmic Rays with Smartphones », D. Whiteson et al., arXiv:1410.2895, Octobre 2015
- « The particle detector in your pocket : The Distributed Electronic Cosmic-ray Observatory », M. Meehan et al., 35th International Cosmic Ray Conference – ICRC2017, Juillet 2017
- « CREDO project », R. Kaminski et al., arXiv:2009.12314, Septembre 2020
- « Determination of Zenith Angle Dependence of Incoherent Cosmic Ray Muon Flux Using Smartphones of the CREDO Project », M. Karbowski, Appl. Sci. 2021,11,1185