



Etudes des rayons cosmiques par
spectrométrie neutron

Guillaume HUBERT

ONERA

THE FRENCH AEROSPACE LAB

r e t u r n o n i n n o v a t i o n

Les rayons cosmiques

1. Brève histoire

2. Les Rayons Cosmiques

3. Spectromètre neutron & Pic du Midi

■ Brève synthèse historique :

• Fin du XIXème, début du XXème :

- Un étrange phénomène est observé : un électroscope se déchargeait continument au cours du temps, même maintenu sous une cloche vide → suggère la présence de particules chargées dans le milieu
- Est ce la radioactivité ? Le blindage de plomb ne l'arrête pas → non

• Charles Wilson, 1901 → hypothèse d'un rayonnement cosmique

• Le Jésuite Allemand Theodore Wulf, 1909 → premières expériences

- Objectif : démontrer que ce mystérieux rayonnement est d'origine terrestre
- Il installe son appareil (électroscope) en haut de la tour Eiffel et démontre l'inverse

• Victor Hess, 1911 → prouva l'existence du rayonnement cosmique

- Mesures en ballon → plus on monte plus l'ionisation augmente

• 1925 : Robert Millikan introduit le terme « rayons cosmiques »

- Hypothèse : les particules chargées résultent de l'interaction du rayonnement gamma (neutre)



Les rayons cosmiques

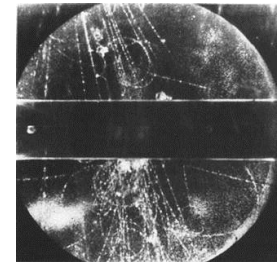
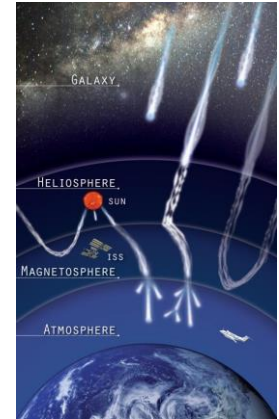
1. Brève histoire

2. Les Rayons Cosmiques

3. Spectromètre neutron & Pic du Midi

■ Brève synthèse historique :

- 1926 : Arthur Compton démontre que le rayonnement varie avec la latitude
 - Démontre donc l'influence du champ magnétique → particules chargées
-
- Du rayon cosmique à la gerbe atmosphérique (Pierre Auger, 1938) :
 - La gerbe contient des milliers de particules secondaires interagissant tour à tour sur l'ensemble de l'atmosphère et couvrant au sol une zone d'autant plus grande que l'énergie est élevée
- 1945-1948 : rayons cosmiques à nouveau étudiés au **Pic du Midi**
 - Giuseppe Occhialini et al. → découverte expérimentale du pion (méson π)
 - Particule, très recherchée de l'interaction « forte », liant entre eux les nucléons (prédite par Hideki Yukawa dès 1935, Nobel 1949)
-



Les rayons cosmiques primaires

1. Brève histoire

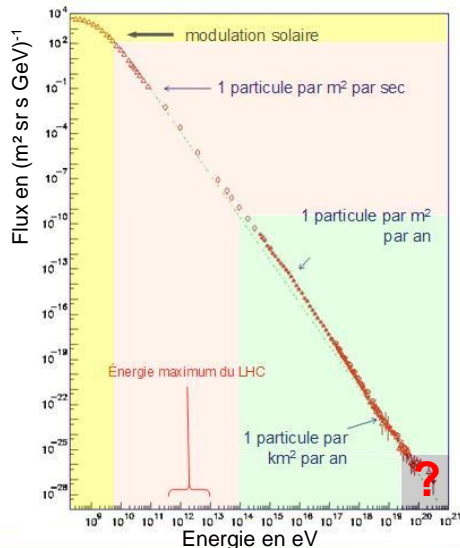
2. Les Rayons Cosmiques

3. Spectromètre neutron & Pic du Midi

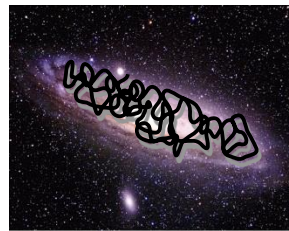
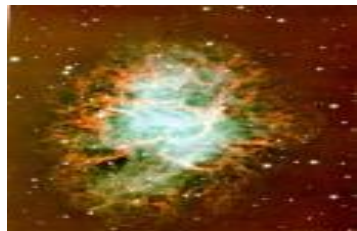
■ D'où viennent les rayons cosmiques primaires ?

• Rôle important des supernovas (émission, accélération)

- Les champs magnétiques les guident et les dispersent (sources non identifiables)
- Incertitude pour les très hautes énergies



Particules solaires



Phénomènes galactiques :
Supernova, étoiles à neutrons ...

Phénomènes extragalactiques:
Collisions de galaxies, noyaux actifs de galaxie (quasar), sursauts gamma ...

Les rayons cosmiques secondaires

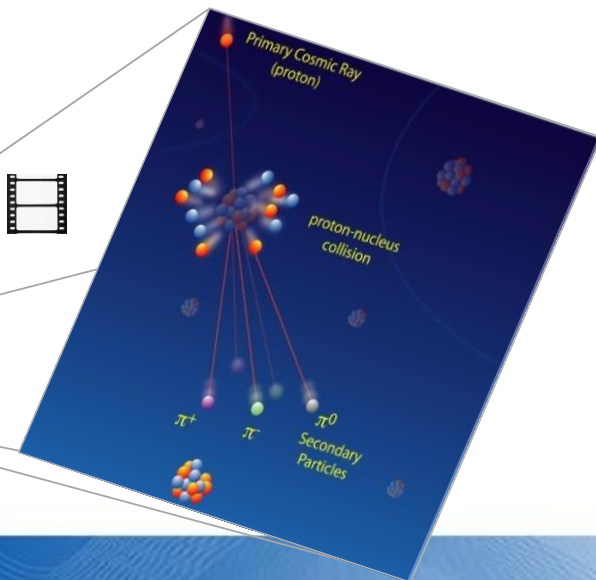
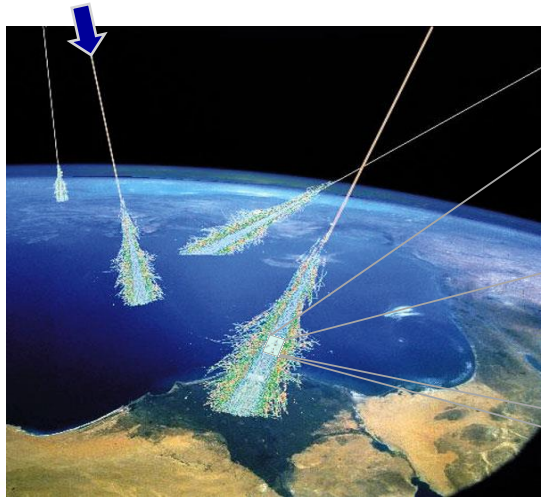
1. Brève histoire

2. Les Rayons Cosmiques

3. Spectromètre neutron & Pic du Midi

■ D'où viennent les rayons cosmiques atmosphériques ?

- Interaction des rayons cosmiques primaires avec les noyaux de l'atmosphère
- Douche cosmique → particules secondaires: neutrons, protons, muons, pions ...



- Le flux augmente avec l'altitude (~ x 2 par 1500 m)
- Le flux augmente avec la latitude (champ magnétique terrestre)
- Impact de l'activité solaire



Fort intérêt de l'**Antarctique** pour l'étude des **rayons cosmiques**

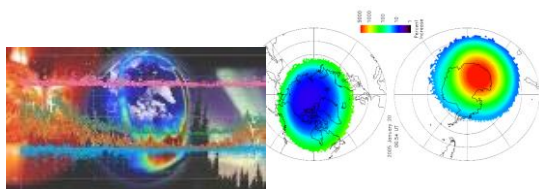
Pourquoi s'intéresser aux rayons cosmiques ?

1. Brève histoire

2. Les Rayons Cosmiques

3. Spectromètre neutron & Pic du Midi

- Des particules qui font parties de notre quotidien ...

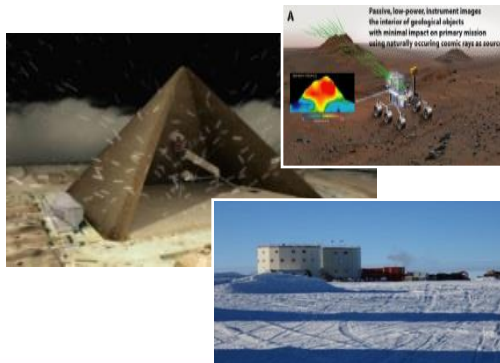


Recherches scientifiques :

- Connaissance de l'environnement radiatif
- Météorologie de l'espace, astrophysique, cosmologie
- ...

Effets sur la matière :

- Impacts sur les électroniques embarquées
- Impacts sur les cellules biologiques
-



Champs d'applications :

- Archéologie
- Volcanisme
- Exploration spatiale
- Datation
- Hydrologie
- ...



Comment obtenir des informations sur les RC ?

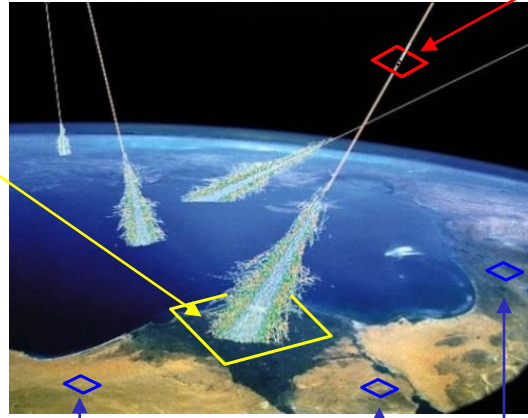
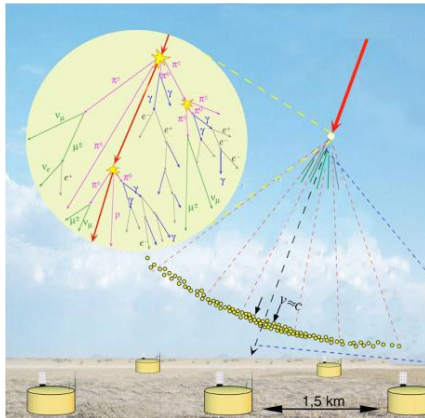
1. Brève histoire

2. Les Rayons Cosmiques

3. Spectromètre neutron & Pic du Midi

- Par la détection de particules primaires et/ou secondaires
 - Mesures des RC primaires, études des douches atmosphériques, mesures distribuées ...

Collaboration Auger
Pour étudier ($E > 10^{19}$ eV)
Surface de 3000 km²



Spectromètre AMS-2 (proton, alpha), ISS



Principal investigator
(PI) : Samuel
Ting, Nobel 76

Réseau de moniteurs à neutrons (limité à

la mesure du flux :
cad **nombre de**
particules /cm² /s)



Le spectromètre neutron

1. Brève histoire

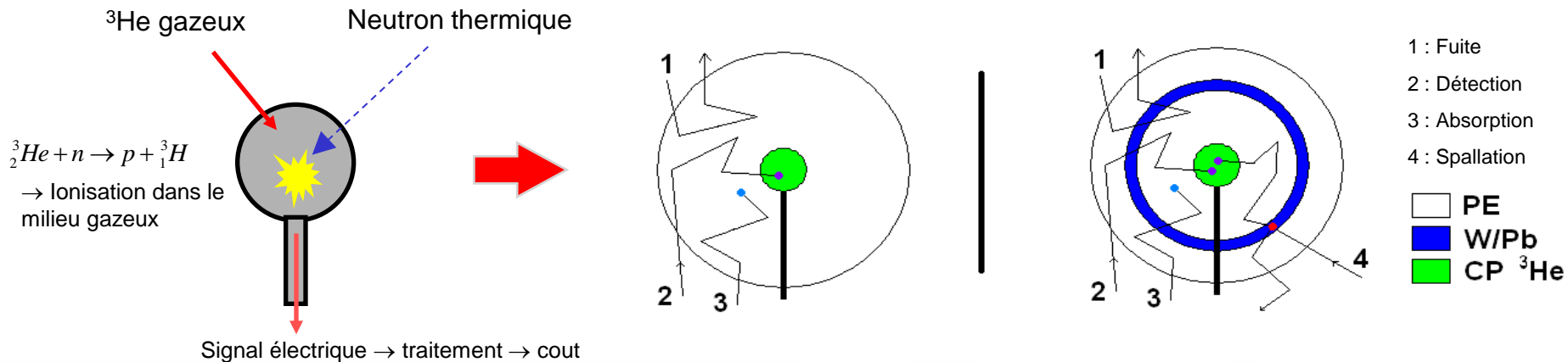
2. Les Rayons Cosmiques

3. Spectromètre neutron & Pic du Midi

■ Spectromètre étendu au domaine des hautes énergies

• Principe des sphères de Bonner : détecteur central de neutrons thermiques

- Compteur Proportionnel (Hélium 3 gazeux), pression à 10 atm.
- Les épaisseurs et natures des coquilles et sphères définissent la réponse du détecteur ^3He
→ Approche multi-sphères : caractériser le spectre de **10 meV à 100 GeV**



Le spectromètre neutron

1. Brève histoire

2. Les Rayons Cosmiques

3. Spectromètre neutron & Pic du Midi

- Premier spectromètre neutron installé au Pic du Midi
 - Installé dans le bâtiment TDF (sommet)
 - Mesures continues depuis Mai 2011 → Séries temporelles



Et presque 10 ans plus tard ...

1. Brève histoire

2. Les Rayons Cosmiques

3. Spectromètre neutron & Pic du Midi

- Déploiement de spectromètres neutrons → réseau mondial

2 – Amérique du Sud
Pico dos Dias (Brésil), 2015



ALMA, +5050 m, 2022



1 - Pic-du-Midi de Bigorre,
+2885 m, depuis mai 2011



3 - Concordia, +3233 m
Depuis déc. 2015



Mesures mobiles sur
bateaux océanographique



Ifremer

- Installation d'un spectromètre au CRA de Lannemezan
 - Etude du cycle de l'eau (atmosphère et sol) via les rayons cosmiques (PhD ONERA, IRAP, CRA)

Quelques résultats ...

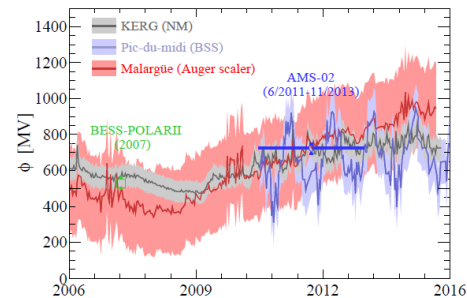
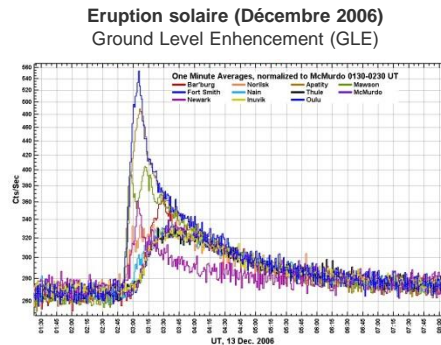
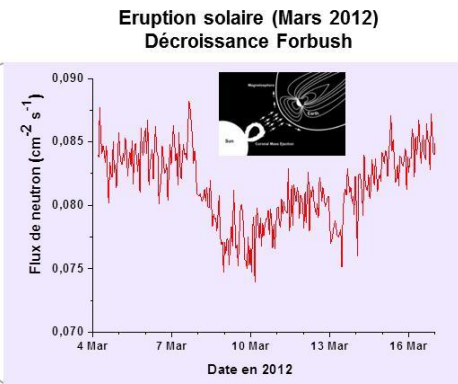
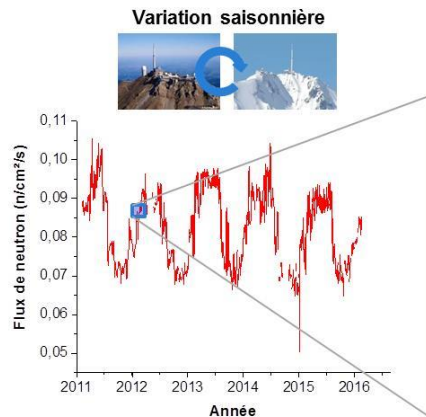
1. Brève histoire

2. Les Rayons Cosmiques

3. Spectromètre neutron & Pic du Midi

■ Analyses long et court-termes

- Variations saisonnières, éruptions solaires, analyses croisées
- Assimilation de données + modèles physiques → modèle global
- Quelques exemples :



1/ Dynamique du flux de neutron

Long-terme et éruption, Pic du Midi de Bigorre

2/ Dynamique du flux de neutron

Multi-sites

3/ Analyses avec les grandes

collaborations ALMA et AMS