

Principes et méthodes de détection: Particules chargées dans l'espace.

Cours 1 : 16/09

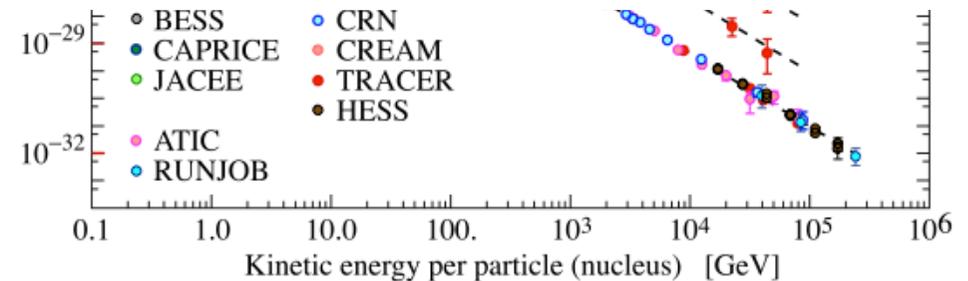
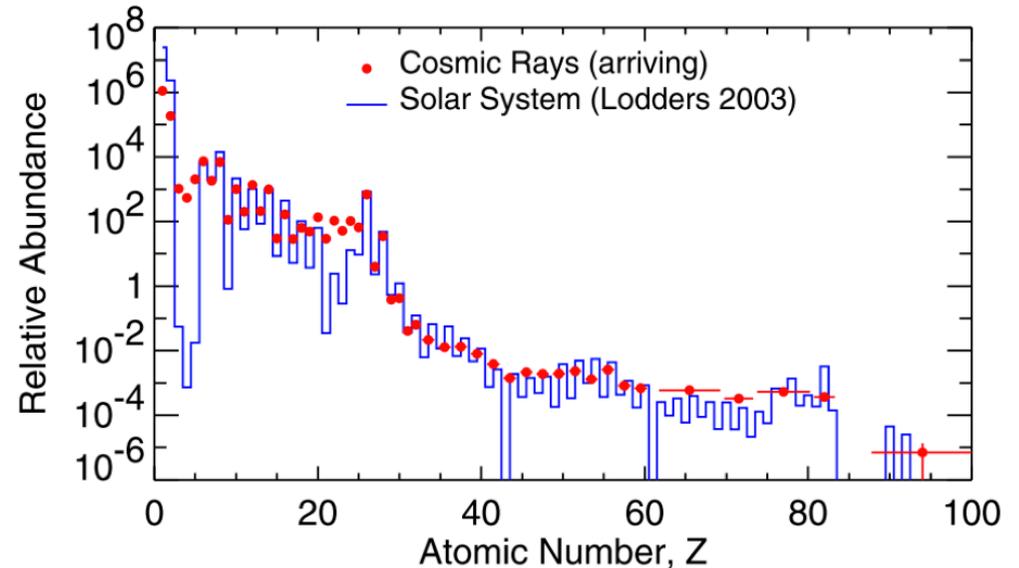
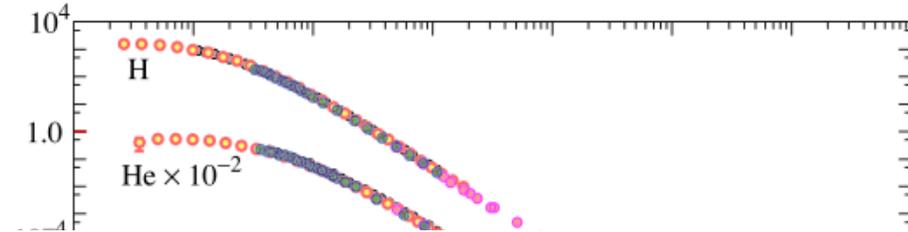
Cours 2 : 17/09

L. DEROME (UJF-LPSC/IN2P3)
Laurent.derome@lpsc.in2p3.fr

Préambule

Ce que l'on a besoin de savoir sur le rayonnement cosmique (RC) pour la suite:

- Flux isotrope
- Spectre en énergie sur 12 ordres de grandeur.
- 30 ordres de grandeur en flux
- Très grande dynamique entre les différentes composantes du rayonnement cosmique (par exemple $p\bar{p}/p \sim 10^{-5}$).
- Spectre typiquement en loi de puissance $E^{-\gamma}$ avec $\gamma = 2.7-3.5$ à haute énergie.



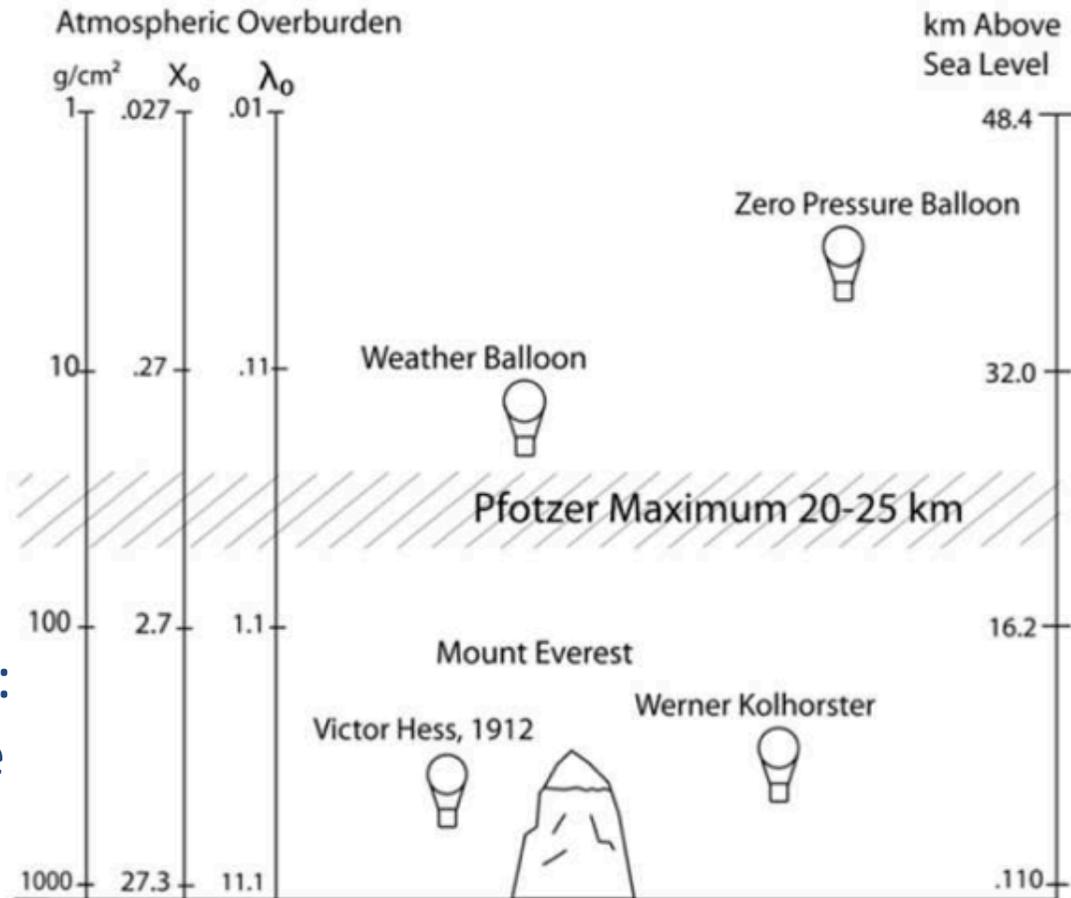
Détection du RC

L'atmosphère terrestre représente :

- Une quantité de matière $\sim 1000 \text{ g.cm}^{-2}$
- ~ 11.5 longueurs d'interaction nucléaire
- ~ 28 longueurs de radiation

→ Détecteur à haute altitude :

- Ballons stratosphérique
- Espace (Satellite – ISS)

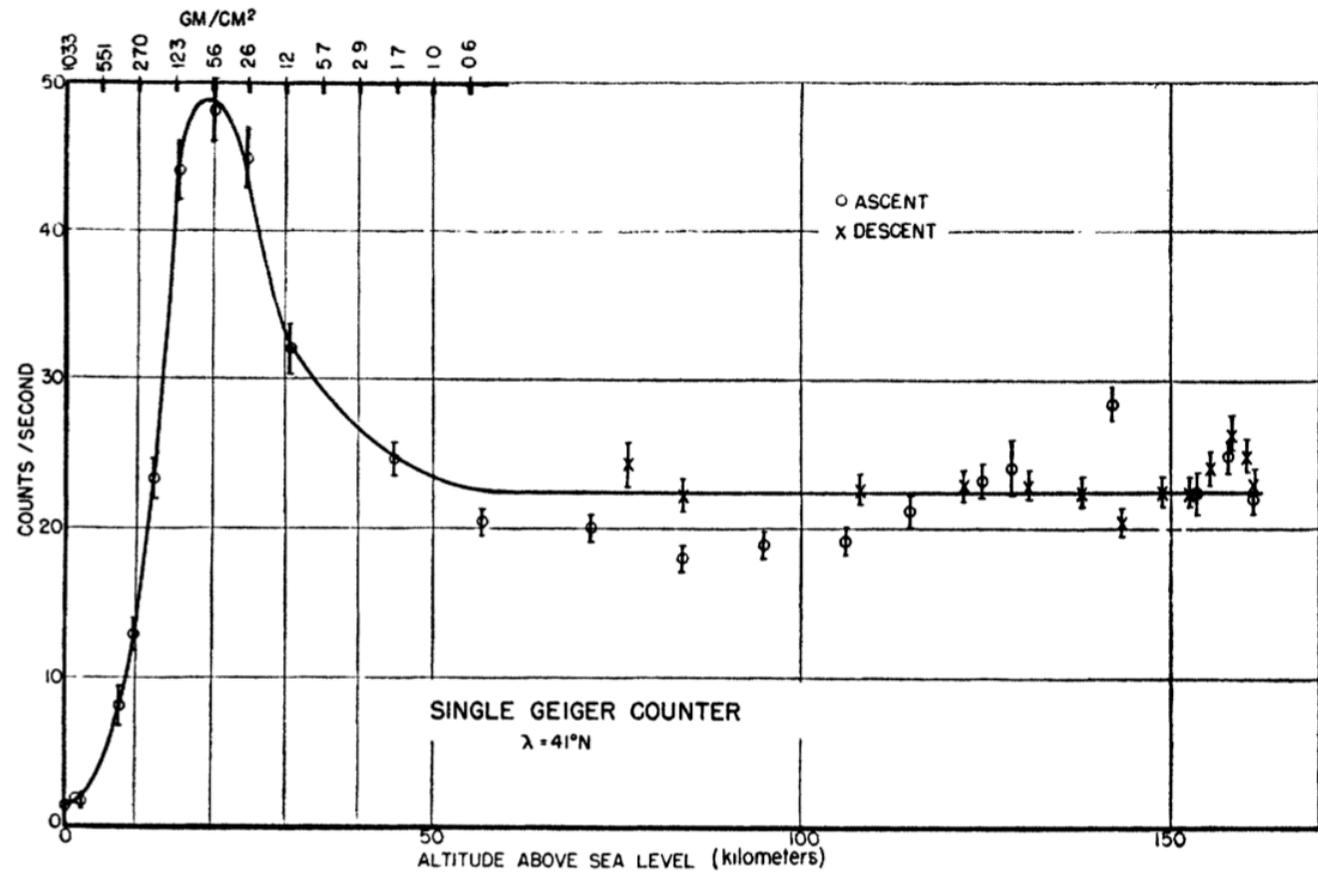
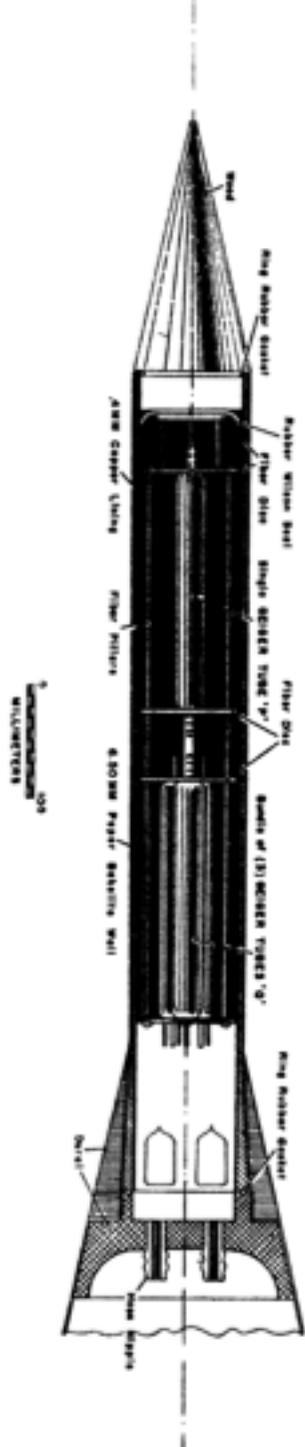


The Cosmic-Ray Counting Rate of a Single Geiger Counter from Ground Level to 161 Kilometers Altitude

J. A. VAN ALLEN AND H. E. TATEL*

Applied Physics Laboratory, Johns Hopkins University, Silver Spring, Maryland

(Received October 16, 1947)



Expériences récentes

Expériences ballons

- MASS (1989-1991)
- IMAX (1992)
- CAPRICE (1994-1998)
- HEAT (1994-1995)
- BESS (1994-2000)
- ATIC (2000-2007)
- TRACER (2006)
- CREAM (2004-2010)

Expériences spatiales

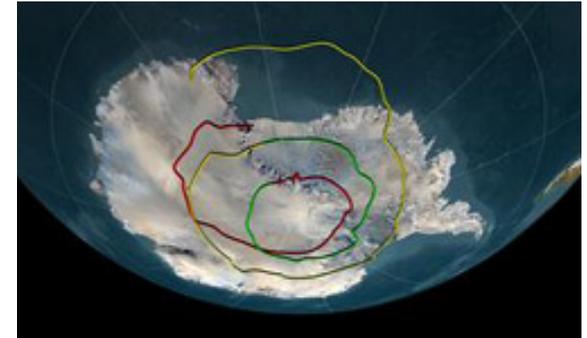
- HEAO3 (1979-1981)
- AMS01 (1998)
- PAMELA (2006-2013)
- FERMI (2008-?)
- AMS02 (2011-?)



Dans la suite, on va utiliser l'expérience AMS pour illustrer les techniques instrumentales et d'analyse pour la mesure du RC

Avantages des vols ballons

- + Programme de développement « court »
- + Contraintes proches mais technologies ~standards
- + Coût plus modéré
- + Risques moindres (échec du lancement, report, ...) [video](#)
- + Plateformes de lancement opérationnelle (MacMurdo – Antarctique)
- + Possibilité de vols longs (jusqu'à ~30 jours, et plus dans le futur...)
- + Possibilité de récupérer le détecteur
- Altitude de vol 4-5 g/cm² d'atmosphère au dessus



Préambule...

- Enjeux scientifiques :
 - Sources du RC, accélération du RC, recherche de sources locales.
 - Processus de propagation, propriétés de la Galaxie (taille du halo...)
 - Activité solaire, modulation du RC
 - Origine de l'antimatière dans le rayonnement cosmique, recherche de matière noire
- Point important: détection en un point particulier de la Galaxie, sensible à l'environnement local, (système solaire, Terre).

Plan du cours

Cours 1

1. Propagation du RC dans l'environnement « local » :
 1. Cavité solaire
 2. Magnétosphère terrestre
2. Le détecteur AMS.
3. Caractérisation/calibration du détecteur à partir des données: quelques exemples

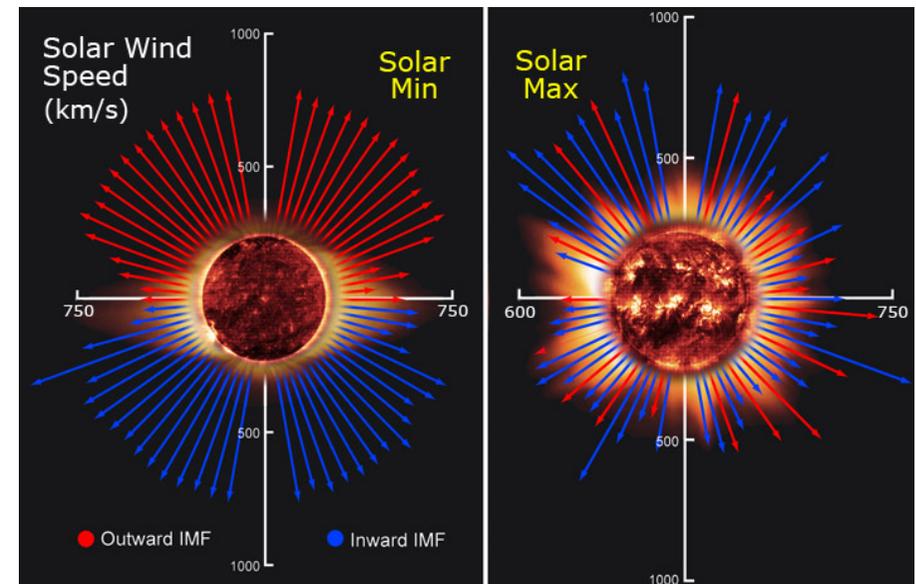
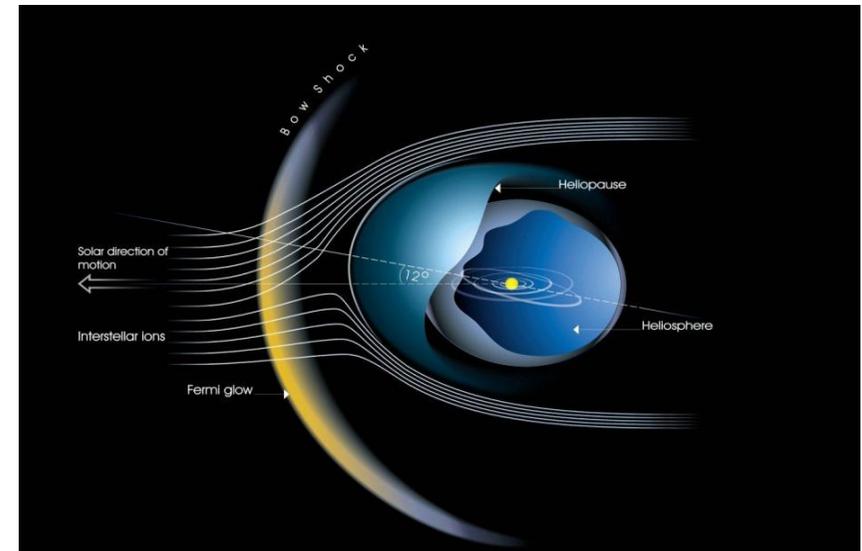
Cours 2

4. Exemples d'analyses:
 1. Fraction de positrons.
 2. Flux de protons.
 3. B/C
- Illustrer les problématiques, les moyens de détections et les techniques d'analyses que l'on peut mettre en œuvre dans le domaine

Cavité solaire – l'héliosphère

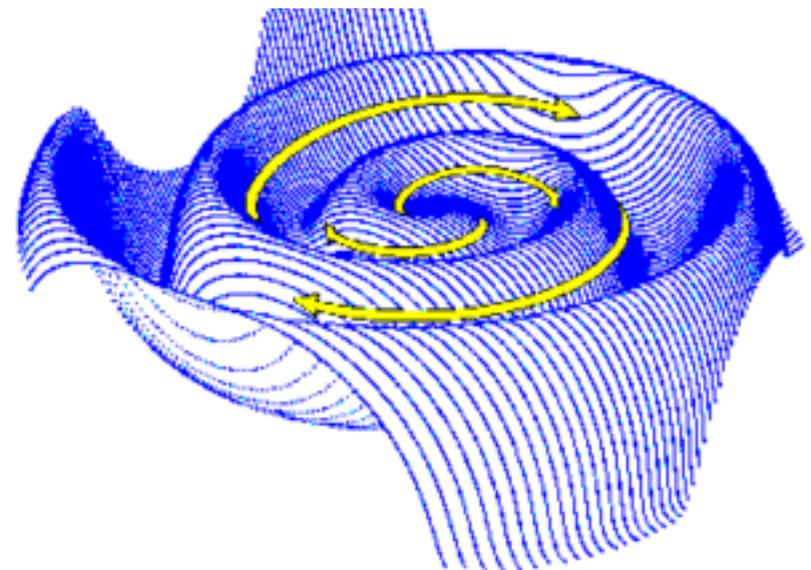
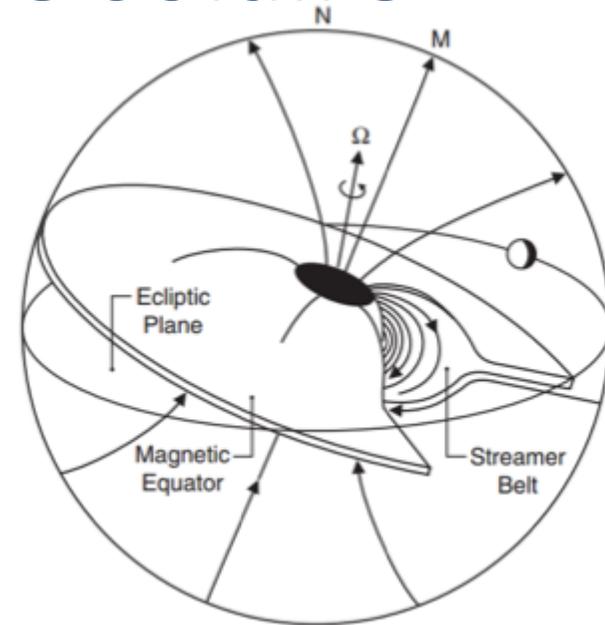
A region of space influenced by the sun and its expanding **Corona** :
solar wind *size : 100-150 AU*

- Solar wind: a continuous flow of charged particles from SUN with velocities around 400 Km/s
 - mainly composed of electrons and protons
 - flux $\sim 10^{12}$ particles/m².s
- Solar magnetic field

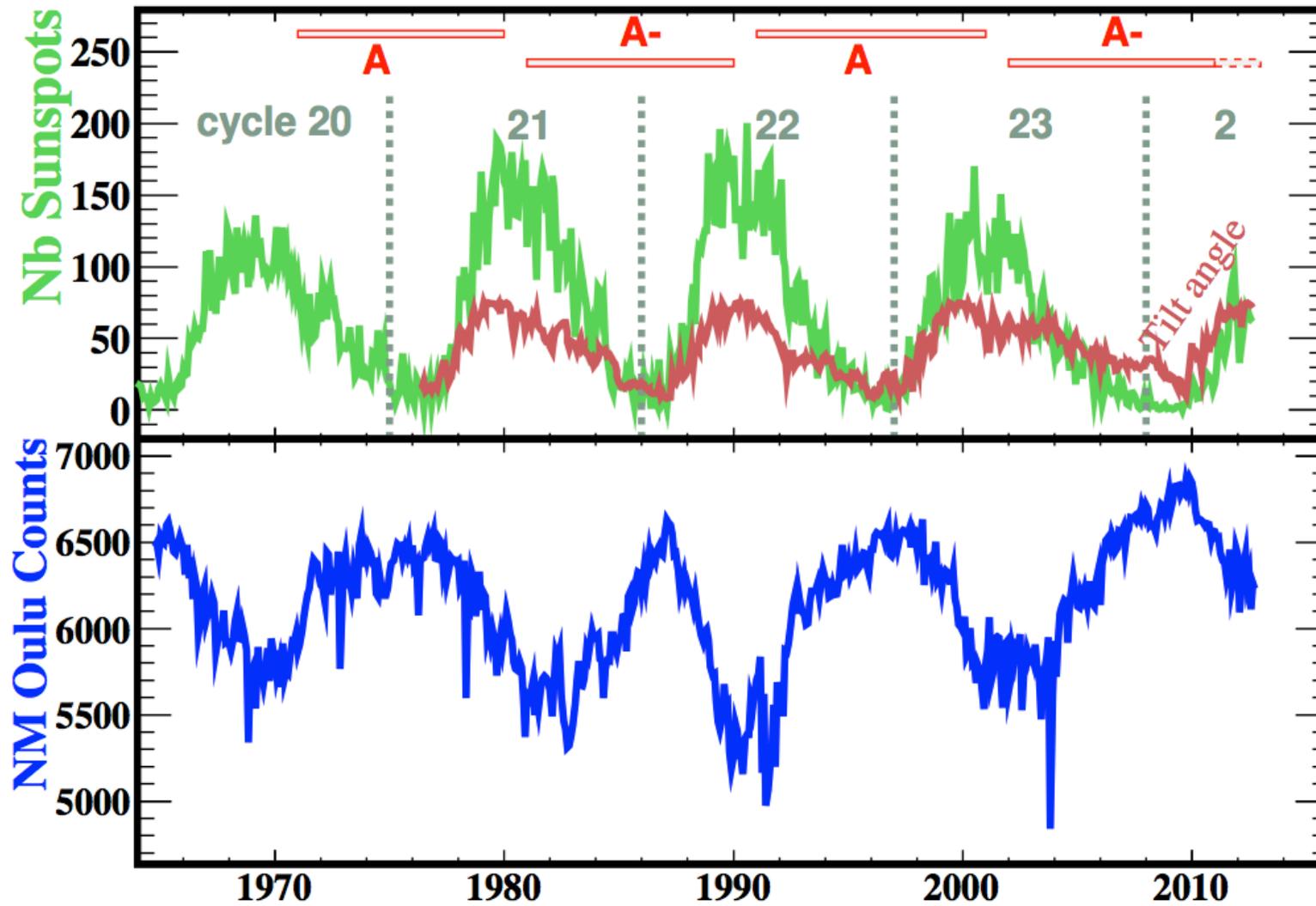


Champ magnétique solaire

- Le soleil tourne sur lui-même avec une période de ≈ 27.27 days (Carrington rotation)
- Le champ magnétique est proche d'un champ dipolaire près des pôles.
- Le vent solaire transporte le champ dans l'espace interplanétaire.
- Offset entre l'axe du champ et l'axe de rotation qui augmente quand on passe du minimum au maximum solaire.
 - Spirale de Parker
- Structure du champ plus complexe quand on approche du maximum
 - Renversement de la polarité



Cycles du soleil



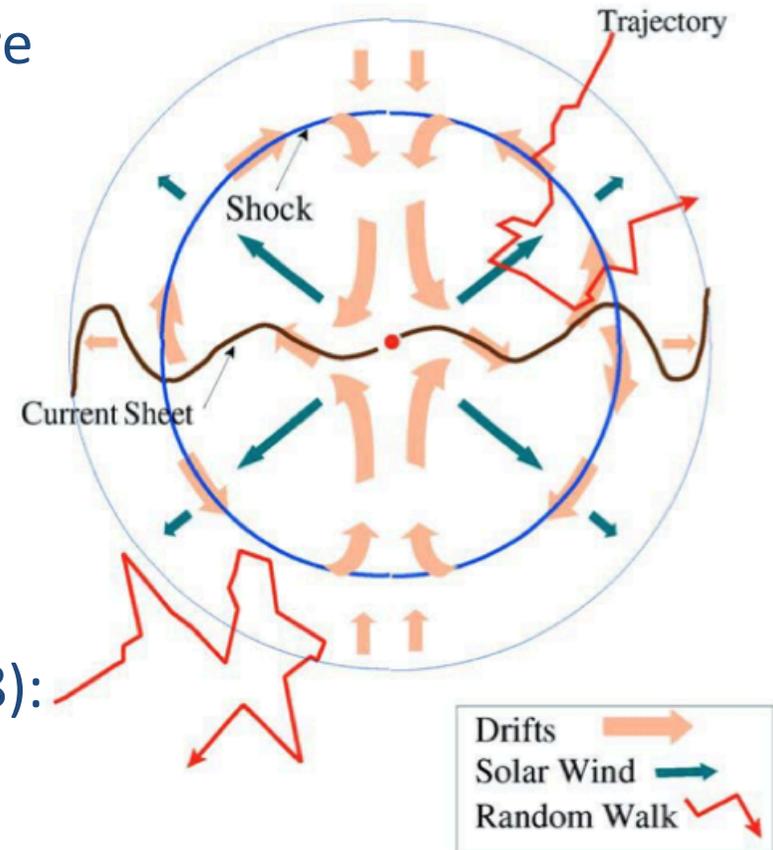
Modulation solaire

Une particule entrant dans l'héliosphère va interagir avec :

- Le vent solaire
- Les irrégularités du champ magnétiques
- Le champ magnétique à plus échelle (**Spirale de Parker**)

Simplifications (Gleeson et Axford 1968):

- Vent solaire radial et de vitesse constante
- Symétrie sphérique de l'héliosphère.
- Pas de dérive – Pure diffusion
- Système à l'équilibre



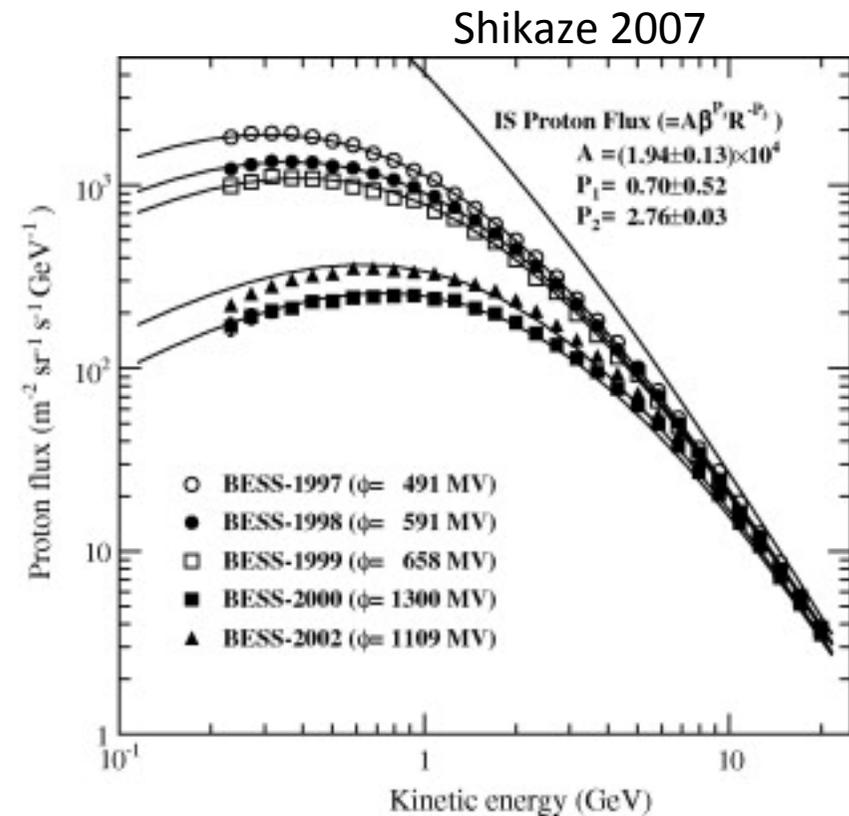
Approximation Force field

- Modèle le plus simple : Force-Field

$$J(E, t) = \frac{E^2 - M^2}{(E + \Phi(t))^2 - M^2} J^{IS}(E + \Phi(t))$$

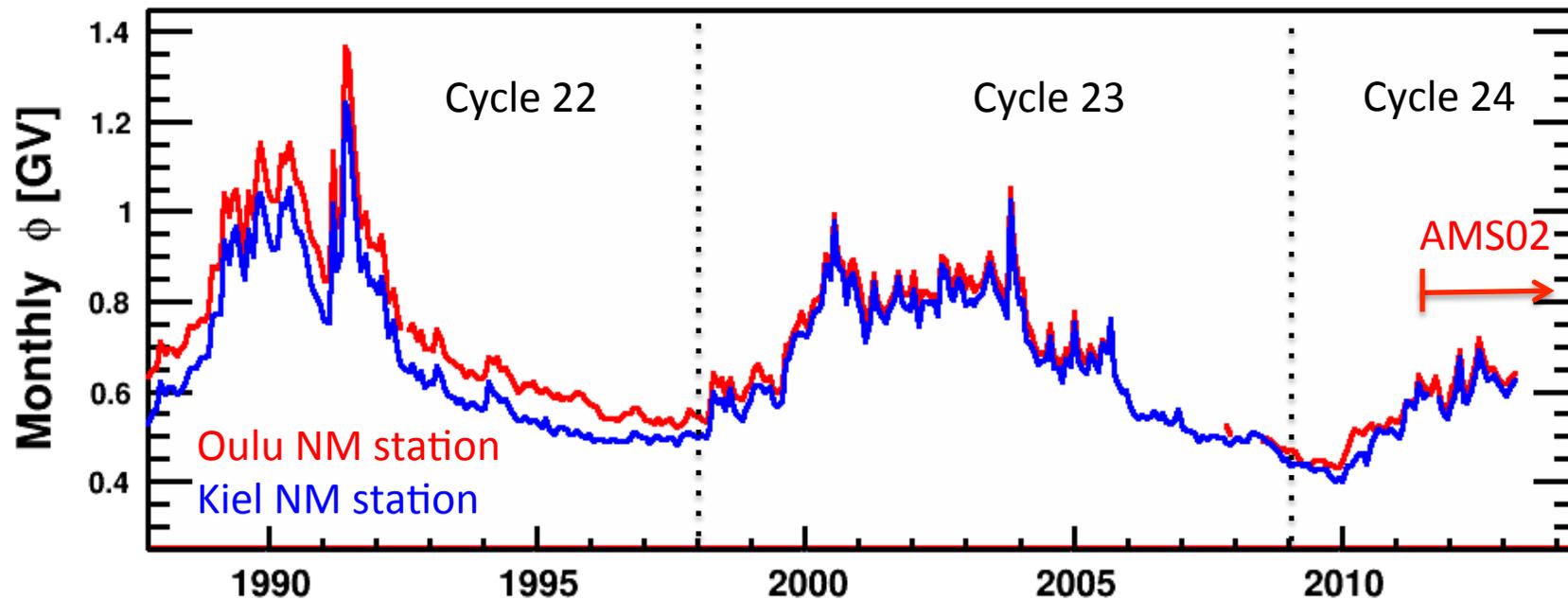
Où $\Phi(t)$ est la paramètre de modulation
→ Toute la dépendance en temps est
contenue dans $\Phi(t)$

$eZ \times \Phi(t)$: Energie moyenne perdue par le
RC lors du transport dans la cavité solaire.



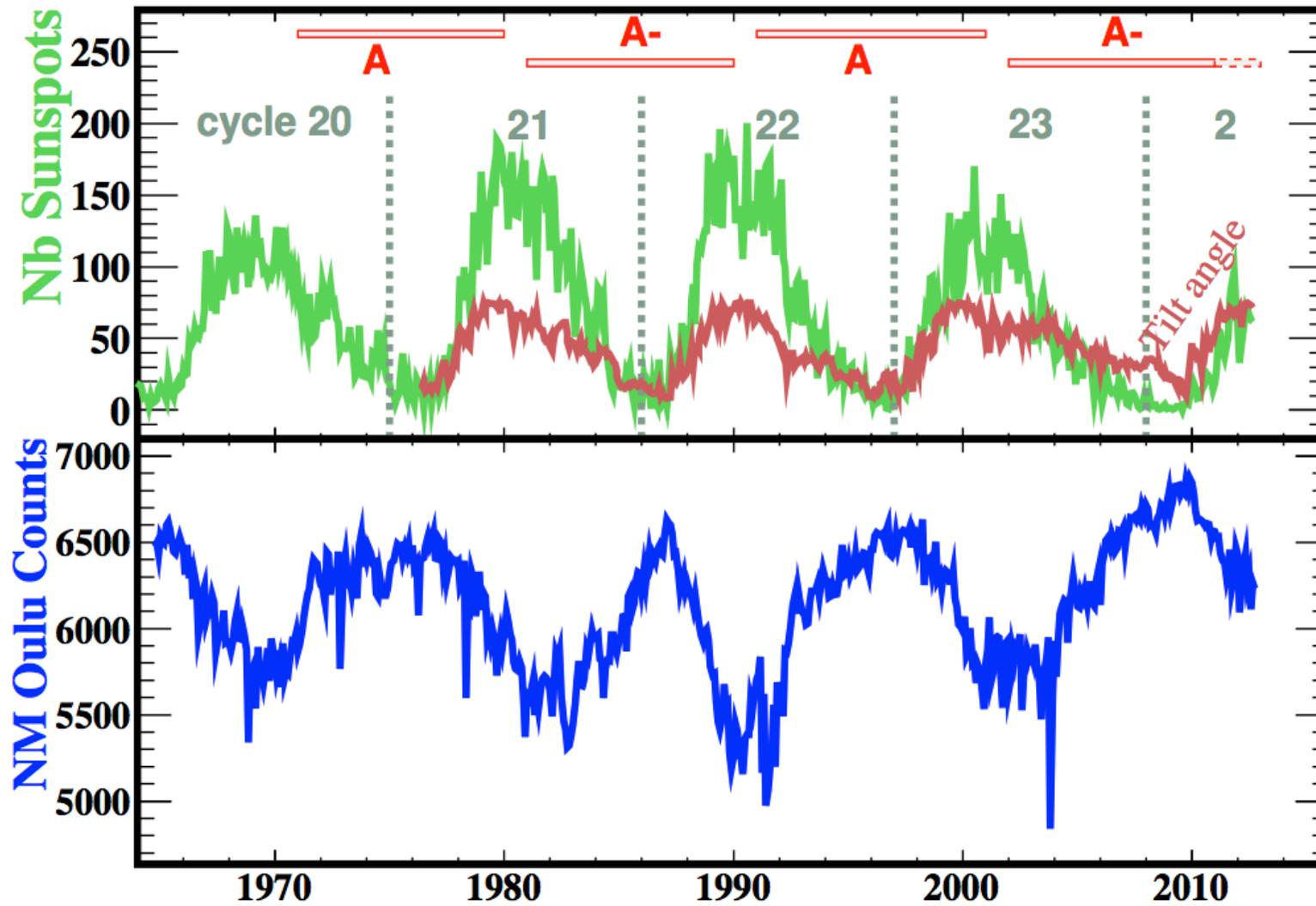
Ground-based Neutron Monitor

- ~30 active stations all over the world (different latitudes and altitudes)
- Some in operation for decades
- Cannot measure the energy spectrum or the composition of cosmic-rays
- Energy integrating device: Monitor the Neutron rate \propto Integral of fluxes folded with atmosphere and detector response.
- NM counts can be used to compute the modulation parameter $\phi(t)$:



→ Provide a reference to compare the different experiments.

Cycles du soleil



Champs magnétique terrestre

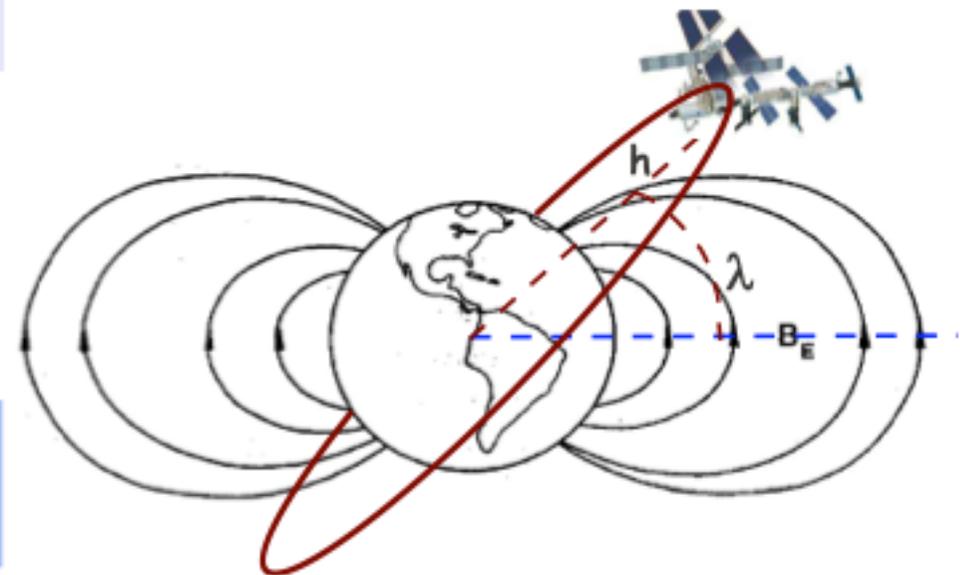
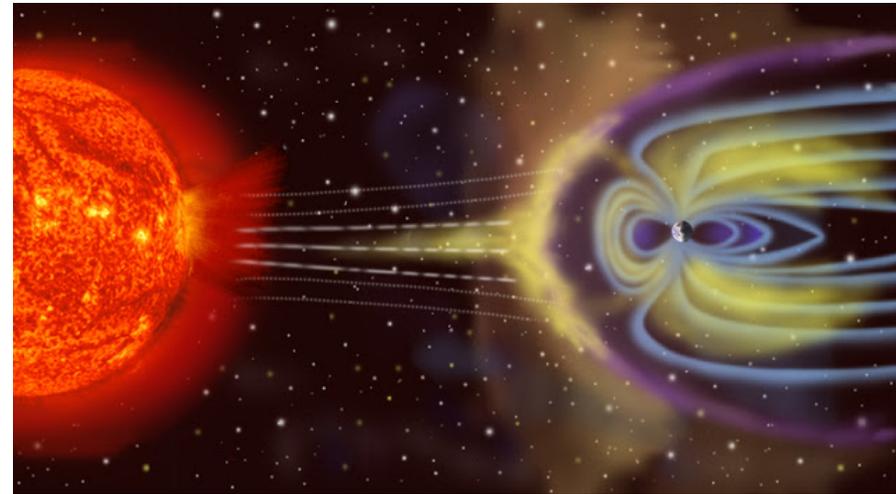
La zone d'influence est appelée la magnétosphère:

- Source principale : champ interne
- Autres sources : courant dans l'ionosphère, ceintures de radiation, pression du vent solaire.

En première approximation (correcte @95%), le champ peut-être considéré comme dipolaire:

- Axe incliné de 11.5° / à l'axe de rotation
- Décentré.

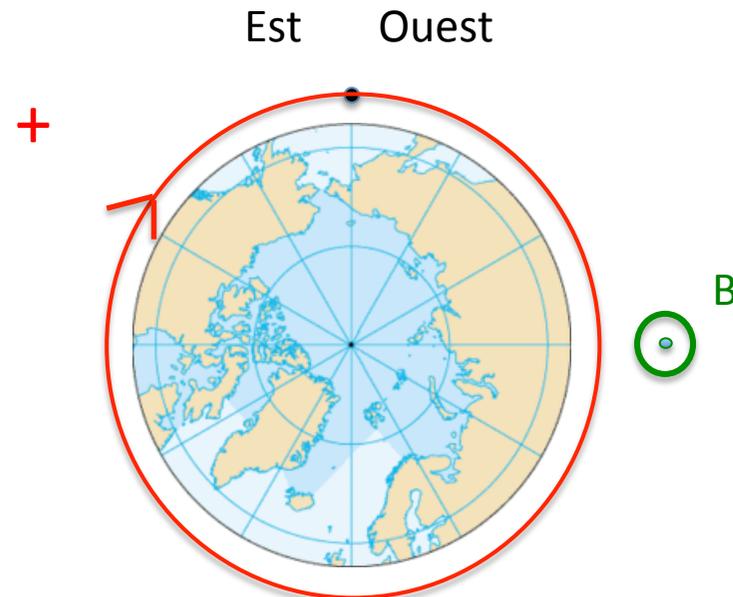
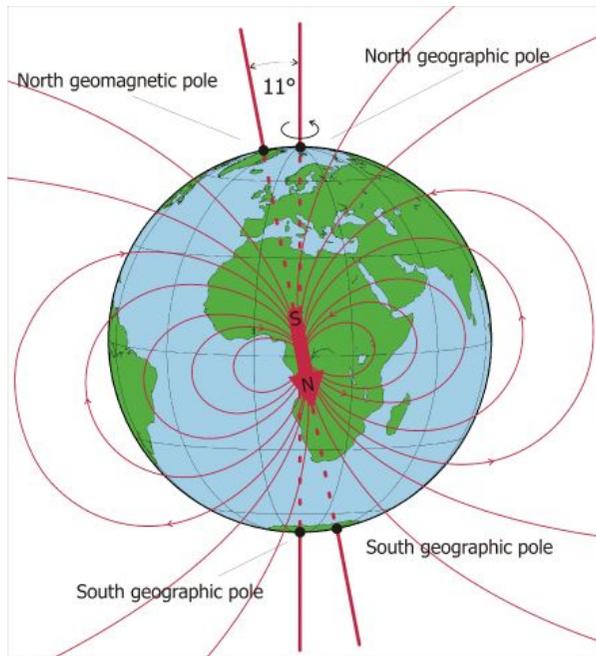
Modèle plus complet: IGRF + Tsyganenko (champ externe)



Champs magnétique terrestre

Dans le plan équatorial, la trajectoire circulaire de rayon $r = r_E$ correspond à la trajectoire donnée par :

$$R = \frac{P}{eZ} = \frac{\mu_0 M}{4\pi r_E^2} = 57 \text{ GV}$$

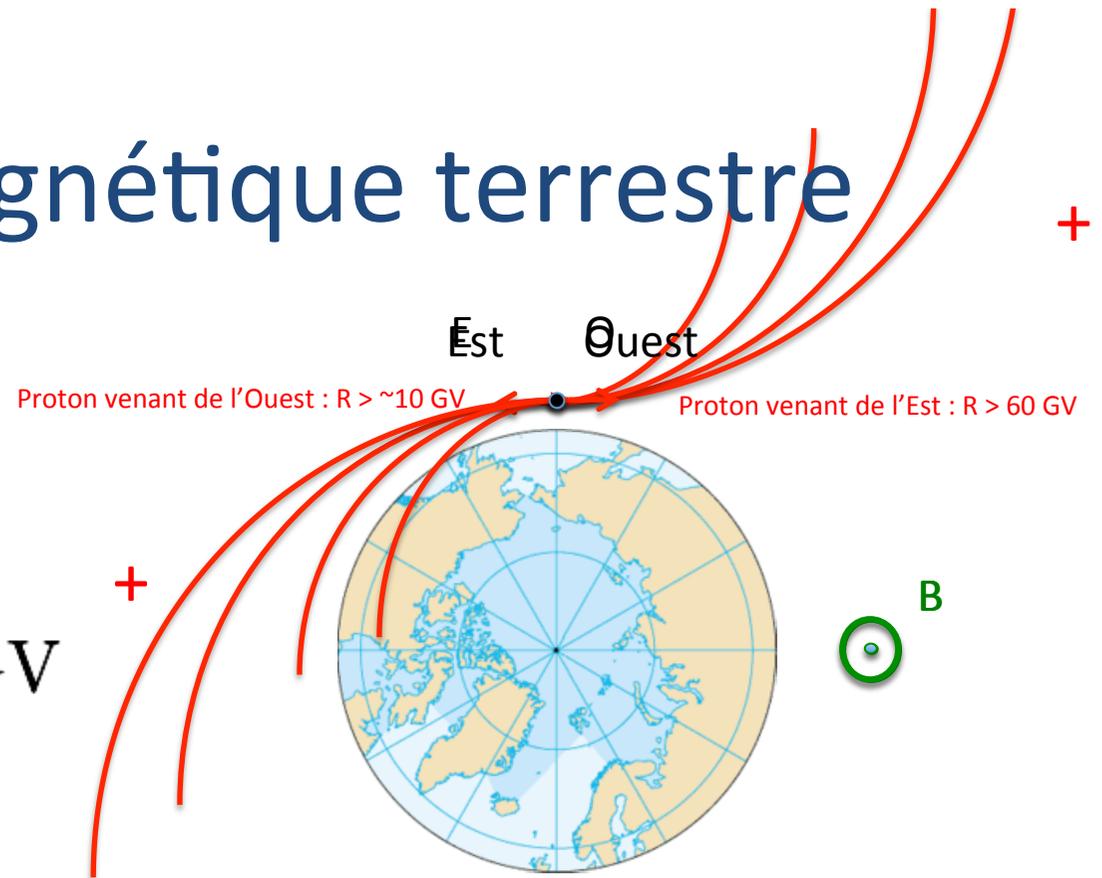
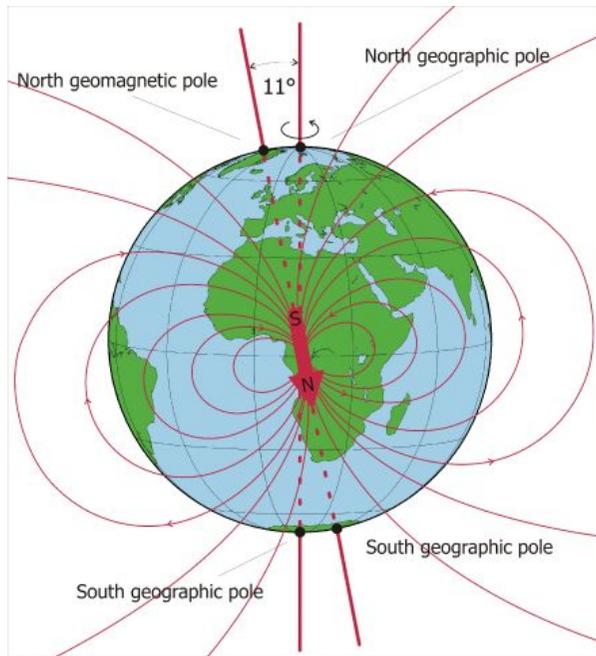


- Effet est-ouest : Plus de proton venant de l'ouest que de l'est
- Cas équatorial correspond au cas extrême : perp. au ligne de champs
→ Diminution de la coupure quand on s'approche des pôles

Champs magnétique terrestre

Dans le plan équatorial, la trajectoire circulaire de rayon $r = r_E$ correspond à la trajectoire donnée par :

$$R = \frac{P}{eZ} = \frac{\mu_0 M}{4\pi r_E^2} = 57 \text{ GV}$$



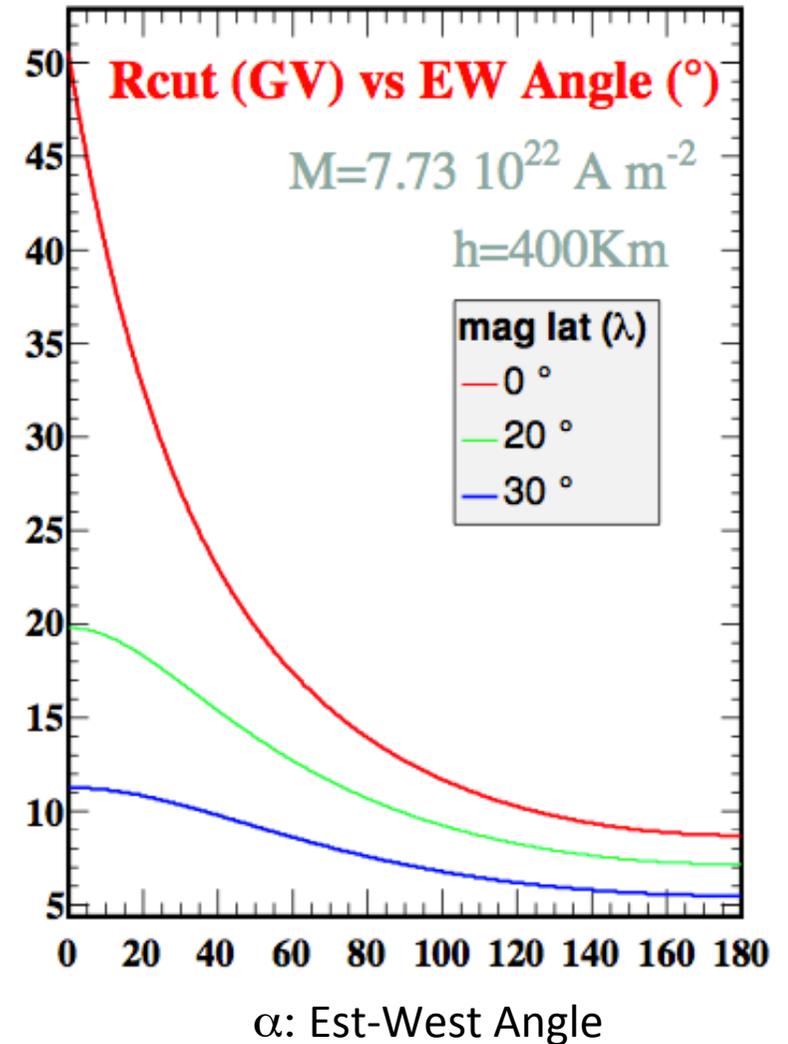
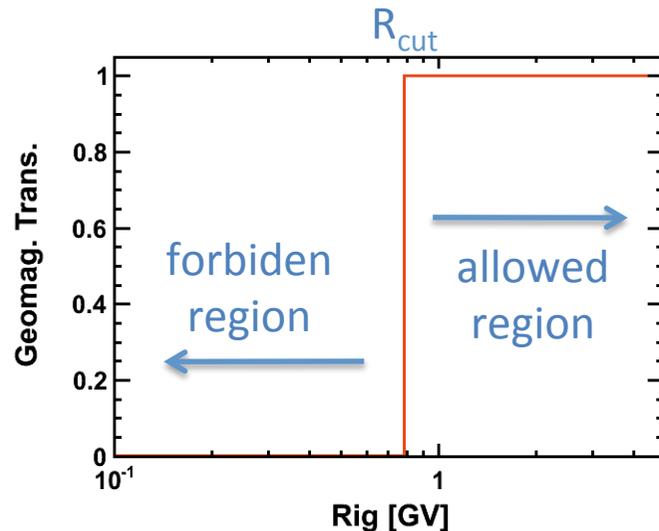
- Effet est-ouest : Plus de proton venant de l'ouest que de l'est
- Cas équatorial correspond au cas extrême : perp. au ligne de champs
→ Diminution de la coupure quand on s'approche des pôles

Champs magnétique terrestre

- Formule de Störmer:

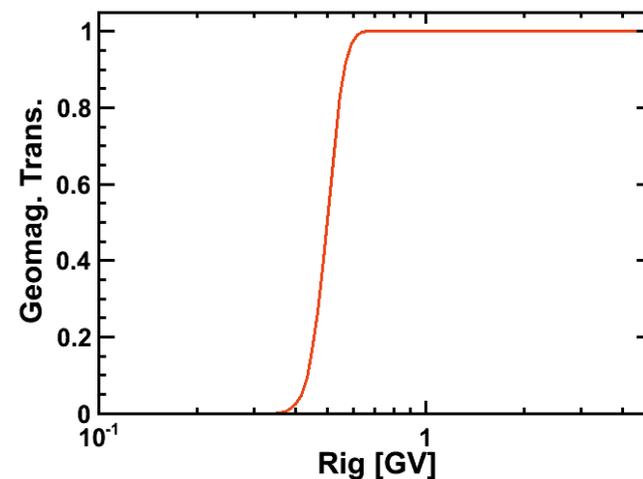
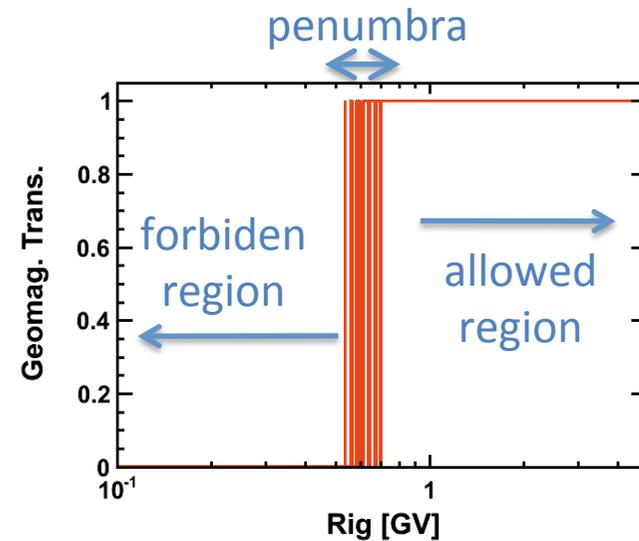
$$R_{cut} = 57 \text{ GV} \left(\frac{R_E}{r} \right)^2 \frac{\cos^4 \lambda}{\left[1 + \left(1 - \frac{z}{|z|} \cos \alpha \cos^3 \lambda \right)^{1/2} \right]^2}$$

- Transmission géomagnétique (pour une latitude et une direction donnée):



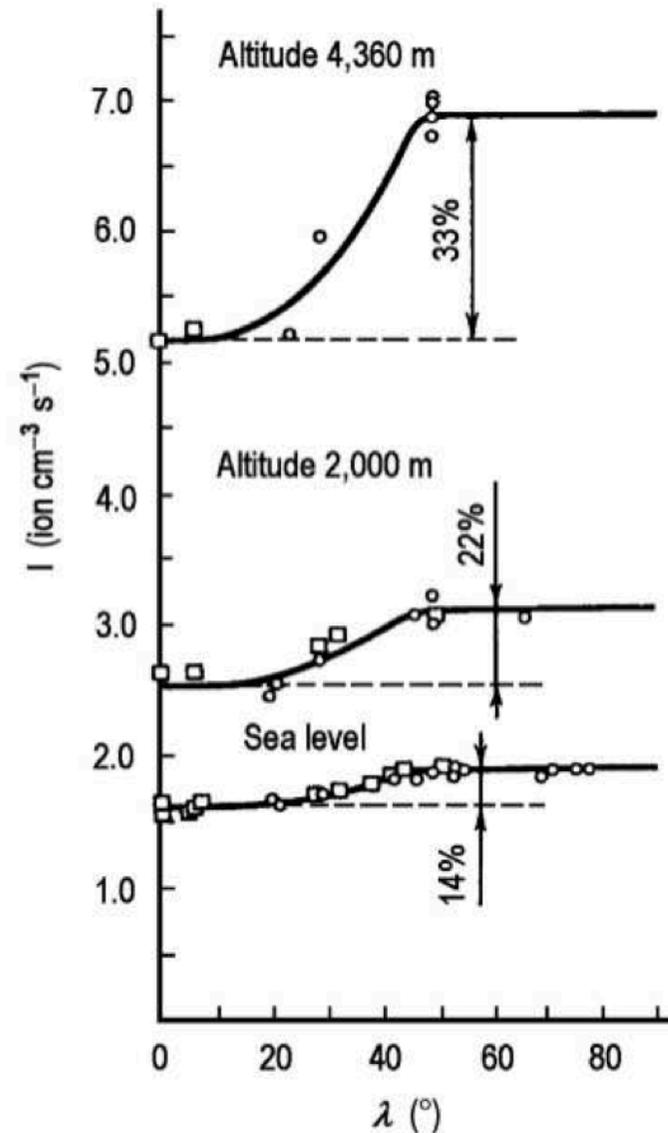
Champs magnétique terrestre

- Dans le champ magnétique réel, la fonction de transmission peut être beaucoup plus complexe
- La taille, la structure de la pénombre dépend de la position et peut évoluer avec le temps (Eruption solaire)
- En pratique : « lissage » de la transmission due à la résolution en détecteur (en rigidité et direction)

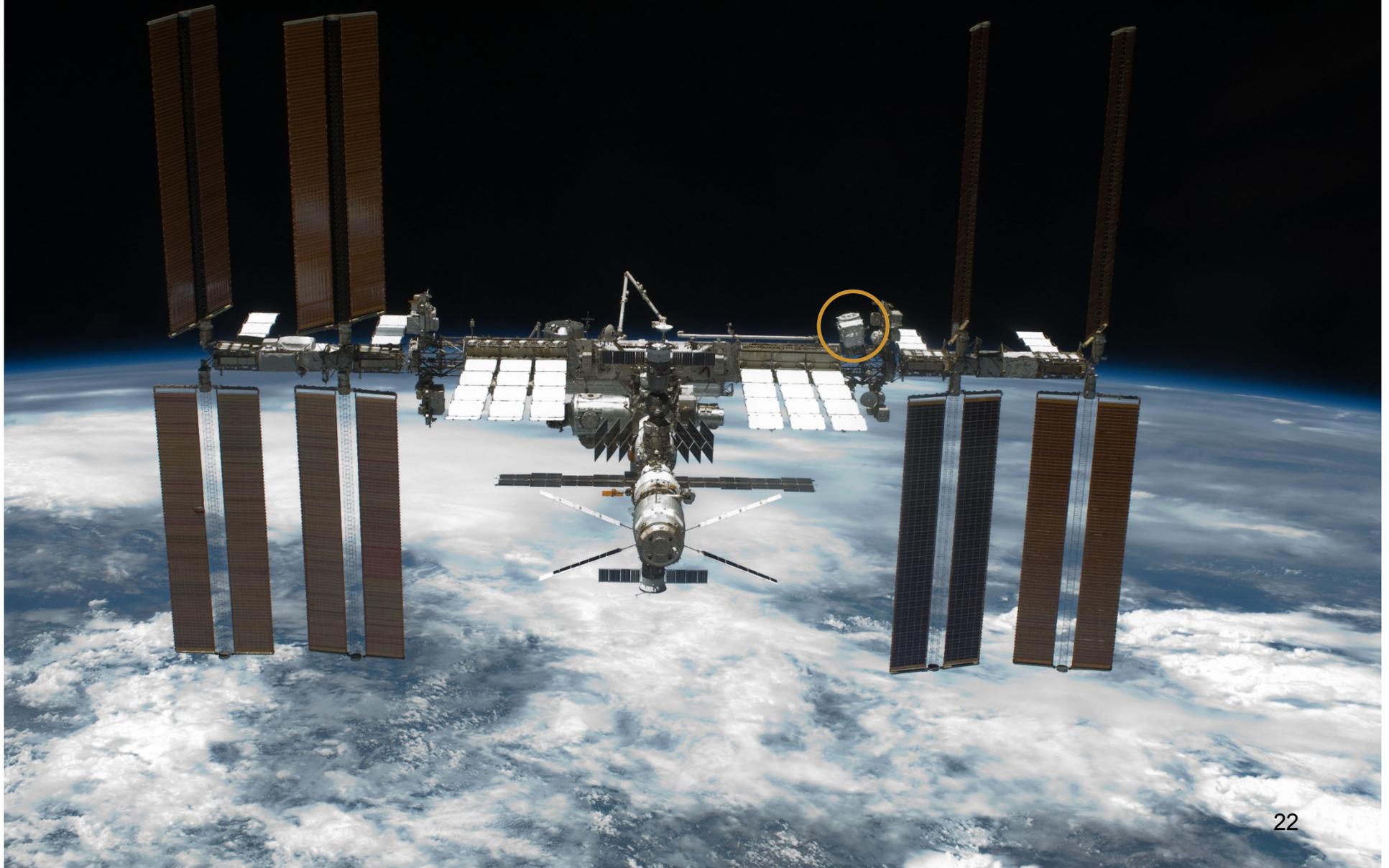


Champs magnétique terrestre

- Jusque dans les années 20, la nature chargée du RC n'était pas établie
- L'effet du champ géomagnétique sur le RC a été observé en 1927 par J. Clay, utilisant une chambre d'ionisation lors d'un voyage entre Java et la Hollande.
- En 1932, Compton organise 11 expéditions à différentes latitudes
→ Claire dépendance prouvant la nature chargée du RC.
- En 1933, observation de l'effet E-W : le rayonnement cosmique est essentiellement composé de charge >0 (proton)



AMS







AMS: A TeV precision, multipurpose spectrometer in space.

TRD

Identify e^+ , e^-

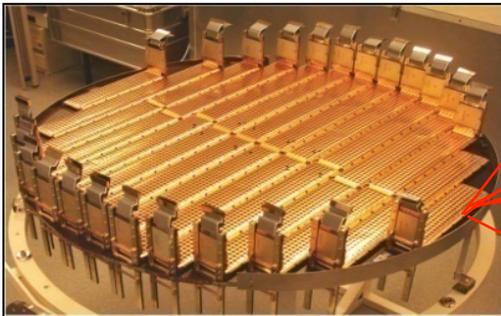


Particles and nuclei are identified by their charge (Z) and energy ($E \sim P$)

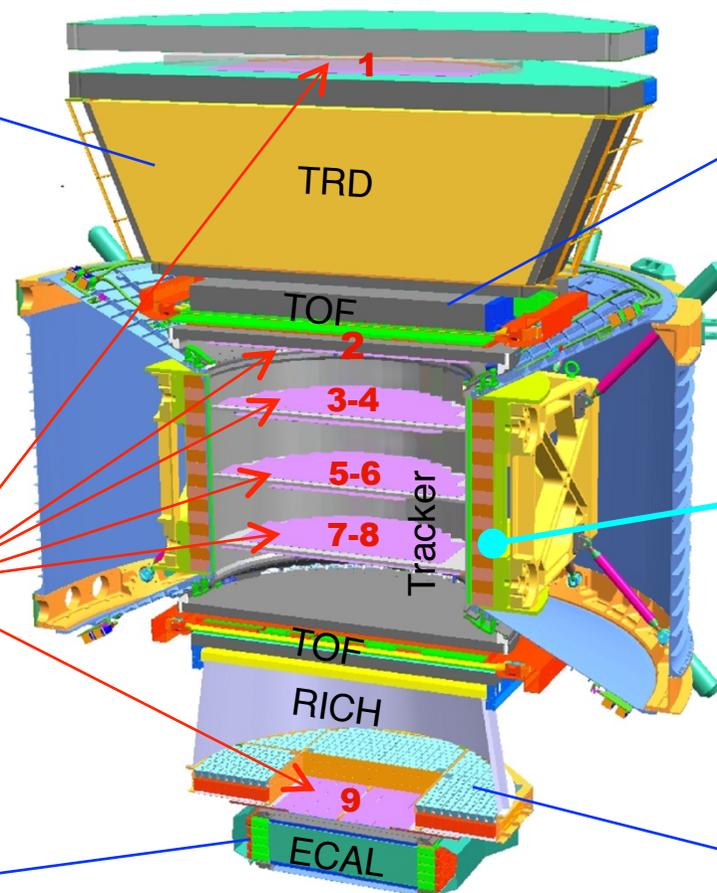
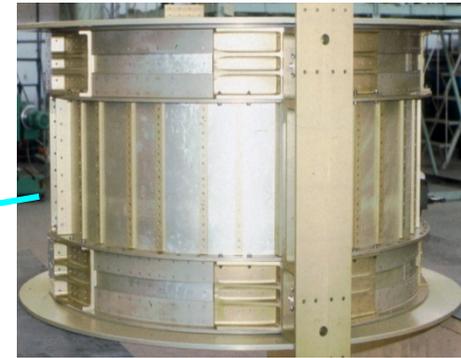
TOF
 Z , Beta



Silicon Tracker
 Z , P



Magnet
 $\pm Z$



ECAL
 E of e^+ , e^- , γ



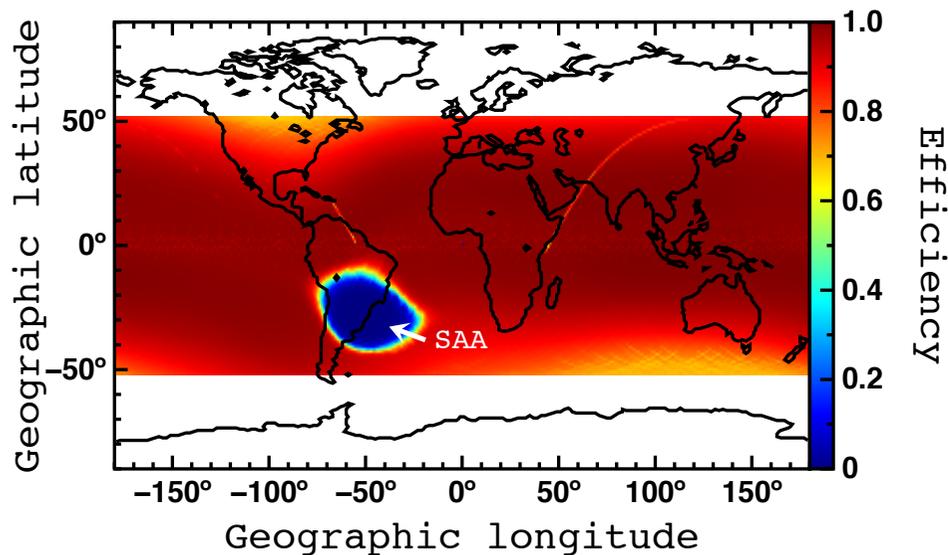
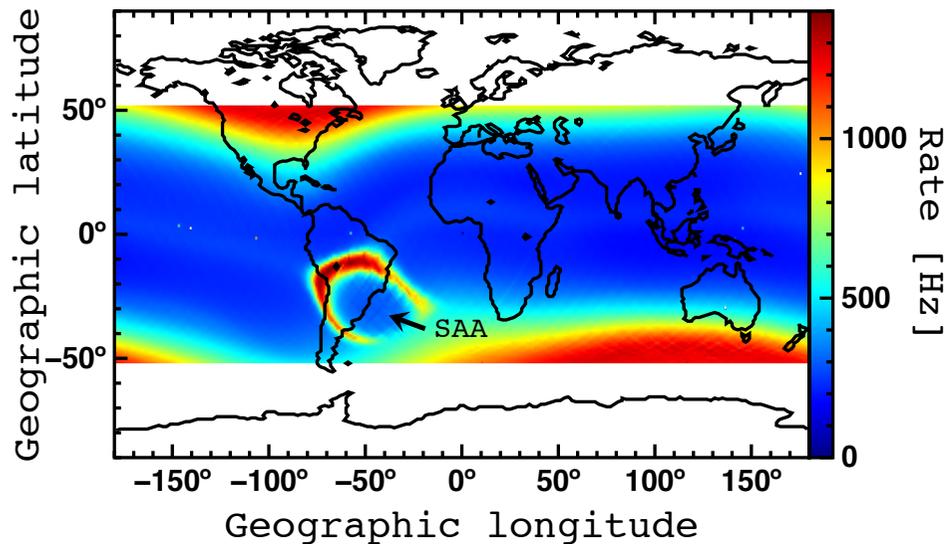
RICH
 Z , Beta



5m x 4m x 3m 7.5 tons

Z , P are measured independently from Tracker, RICH, TOF and ECAL

Opérations en vol



- Détecteur installé sur la station Spatiale le 19 mai 2011.
- En orbite à une altitude de 400 km (90 mn)
- ~40 millions d'événements par jour.
- ~ 100 GBytes par jour transférés (débit moyen 10 Mb/s)
- $16 \cdot 10^9$ triggers/an
- 39 TB de données/an
- 200 TB de données rec./an
- 38 milliards d'événement collectés aujourd'hui

Caractérisation du détecteur

Grace au volume important des données, on peut caractériser les différents sous-détecteurs et leur évolution en fonction de:

- La position de l'ISS
- Le temps (vieillessement,...)
- Température du détecteur.

Quelques exemples:

- Alignement des plans externes du tracker
- Etude de la stabilité du champs magnétique de l'aimant permanent.
- Reconstruction d'indice de réfraction de l'aérogel du RICH

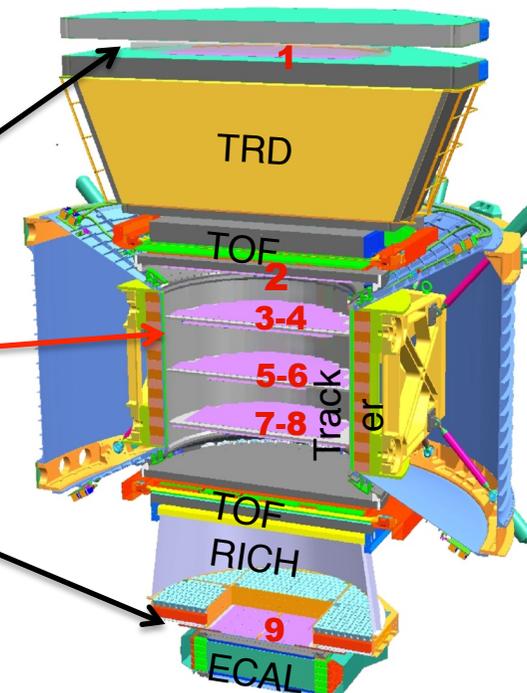
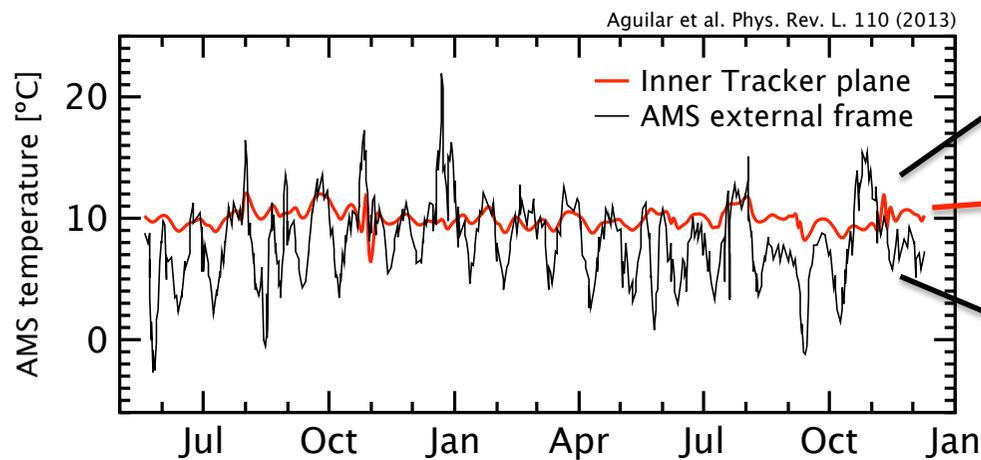
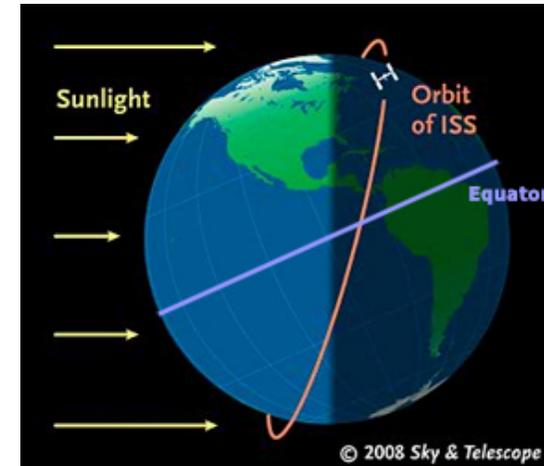
Environnement thermique

Variations importantes des températures:

- Orbite (90mn)
- angle Beta : Soleil – Plan de l'orbite
- Orientation de la station
- Ombre des panneaux solaires

~10 °C sur quelques jours

~20 °C entre jours froids et chauds

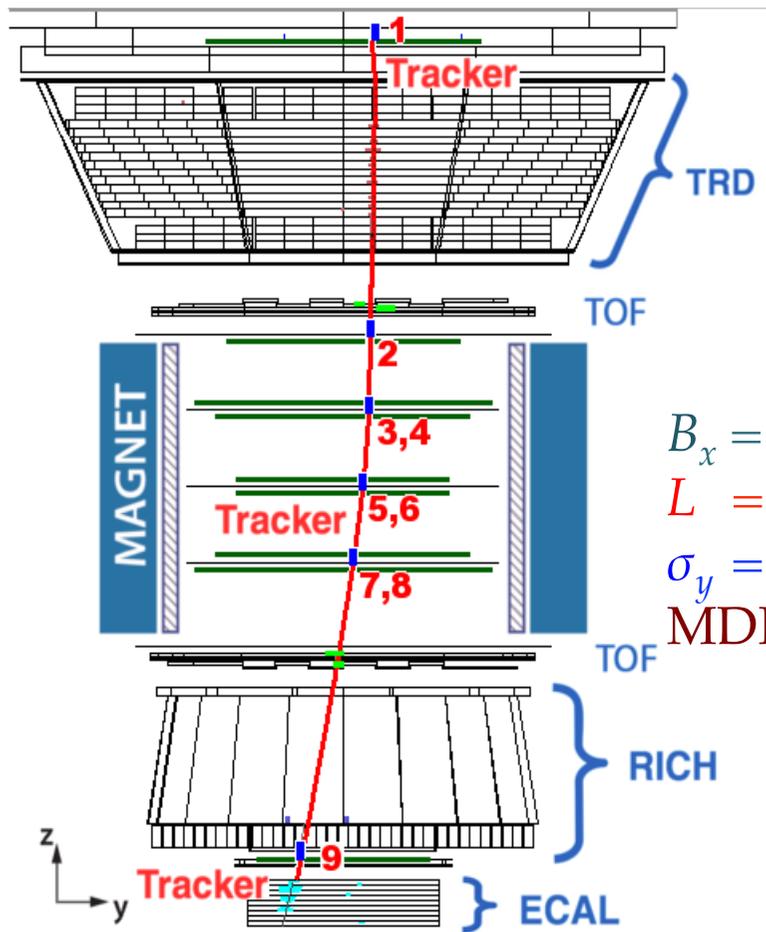


Mesure de la Rigidité

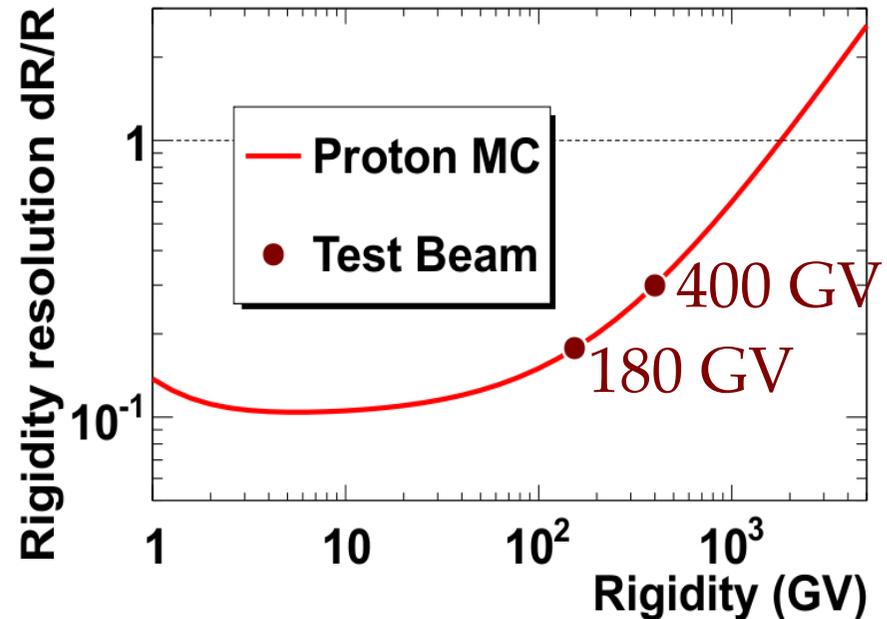
Mesure de la déviation de la trace dans le champs magnétique ($\times 1/R$):

$$\Delta \left(\frac{1}{R} \right) = \text{cst} = \text{MDR} \rightarrow \frac{\Delta R}{R} = \frac{R}{\text{MDR}}$$

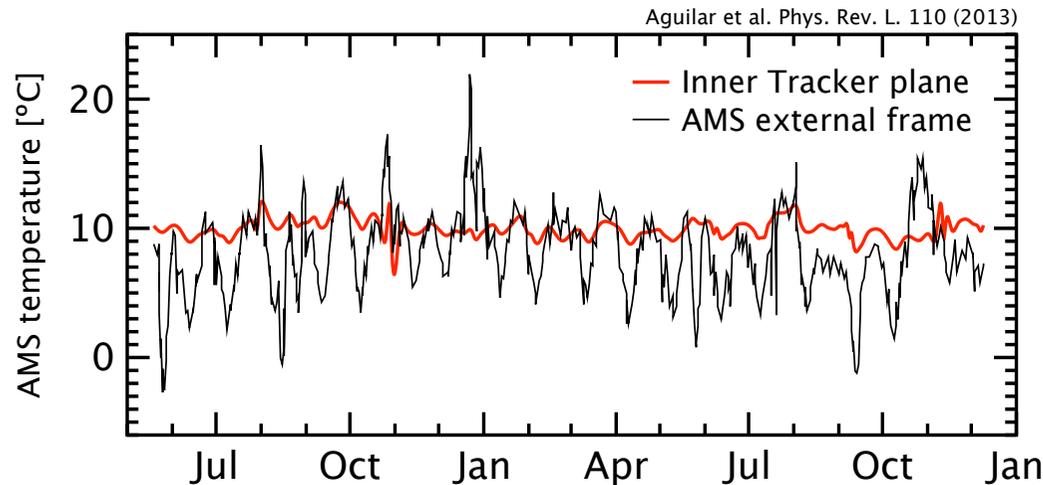
MDR: Maximum Detectable Rigidity



$B_x = \sim 0.14 \text{ T}$
 $L = \sim 3 \text{ m}$
 $\sigma_y = \sim 10 \mu\text{m}$
 $\text{MDR} : \sim 2 \text{ TV}$

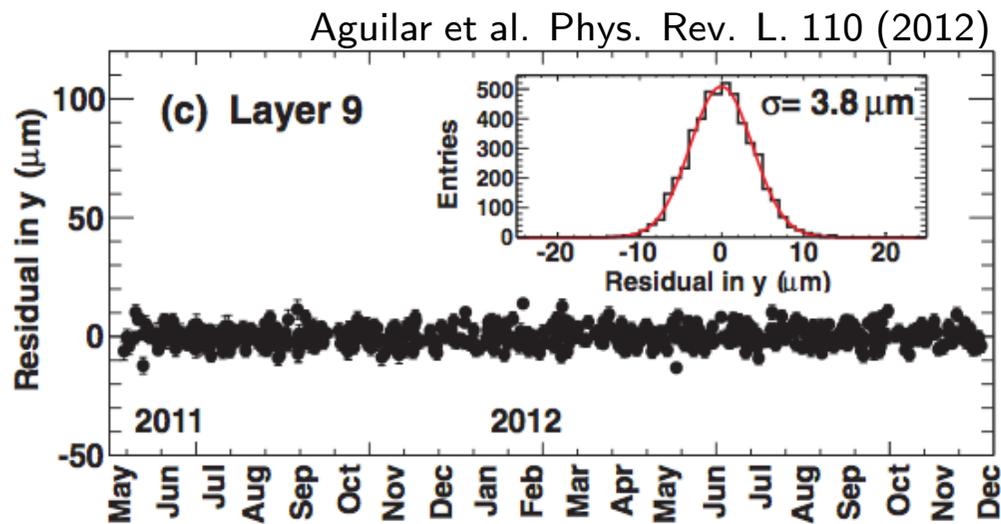


Alignement des plans externes



Variations importantes des températures
 $\sim 10^{\circ}\text{C}$ sur quelques jours
 $\sim 20^{\circ}\text{C}$ entre jours froids et chauds

Mouvements importants des plans externes du tracker (plan 1 et 9)



→ Mise en place d'une procédure d'alignement (x, y, z, θ, ϕ) utilisant l'ensemble des traces

→ Mise à jour de l'alignement toutes les 2 minutes.

Champ magnétique / Temperature

Evolution du taux de protons à haute rigidité ($R > 33$ GV):

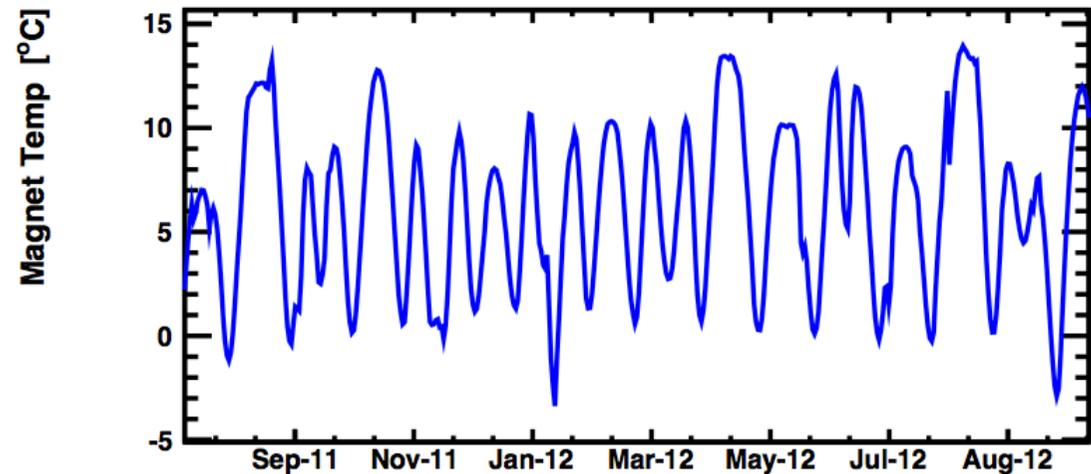
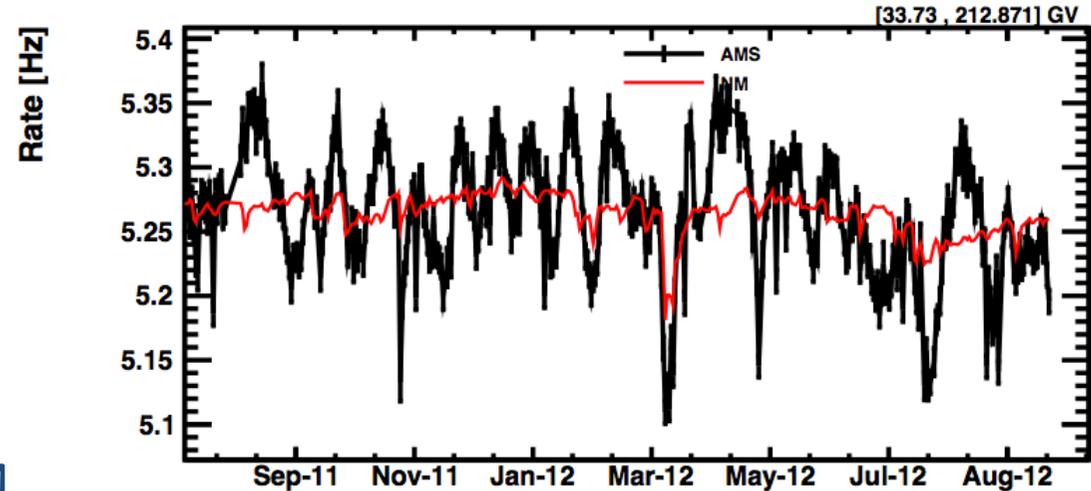
Température de l'aimant ↗

⇒ Champ Mag. ↘

⇒ Courbure de la part. ↘

⇒ Rigidité recons. ↗

⇒ Taux de proton ↗



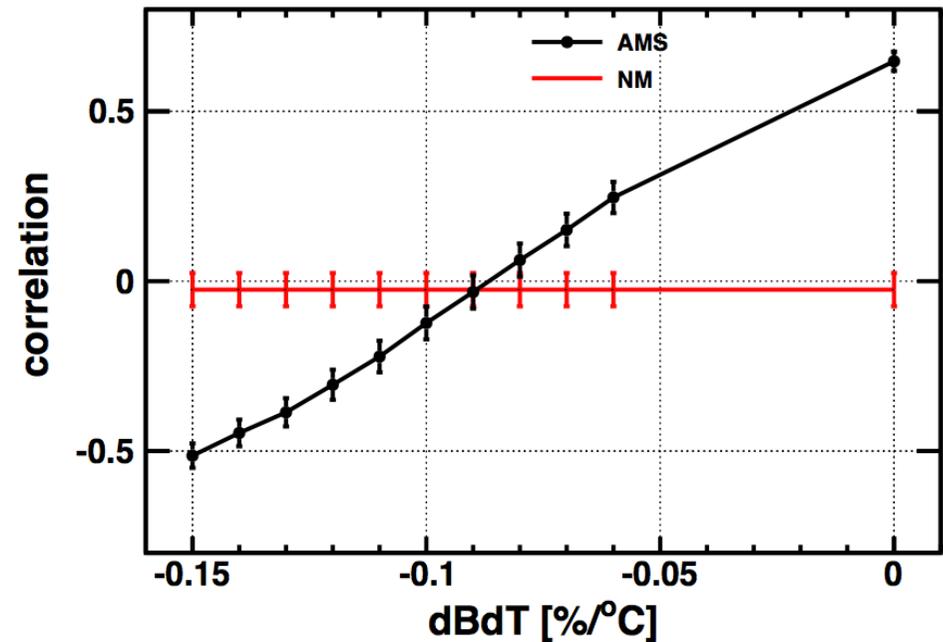
Champ magnétique / Temperature

Dépendance du champs
avec la température:

$$B(T) = B(18.5^{\circ}\text{C}) + \frac{dB}{dT}(T - 18.5^{\circ}\text{C})$$

Etude de la corrélation
entre la température et le
taux de proton:

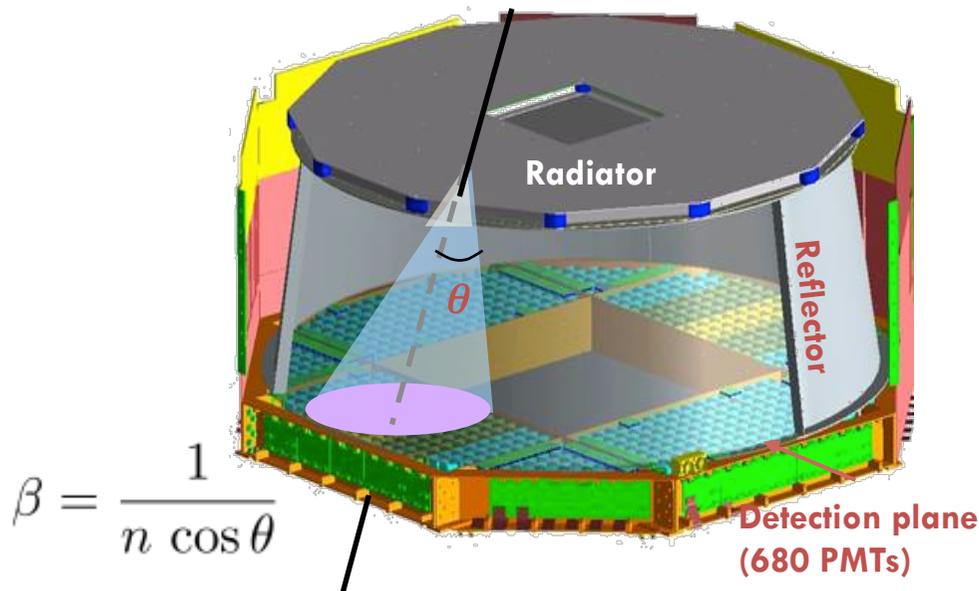
$$\frac{dB}{dT} = -0.09\%/^{\circ}\text{C}$$



Caractérisation des détecteurs: RICH

Reconstruction de la vitesse (taille de l'anneau) et de la charge nombre de photon dans l'anneau.

→ Indice de réfraction reconstruit en chaque point de l'aérogel (0.5x0.5 cm²)



Reconstruction de l'angle cherenkov pour des protons R>50GV ($\beta=1$) → Carte de l'indice de refraction du radiateur.

