

RESULTATS DE L'EXPERIENCE AMS-02



6 juin 2014

Vincent Poireau, LAPP Annecy

PLAN

- Rayons cosmiques
- Expérience AMS
- Mesure de la fraction de positons
- Flux d'électrons et de positons
- Flux de protons et de noyaux d'hélium
- Rapport bore sur carbone

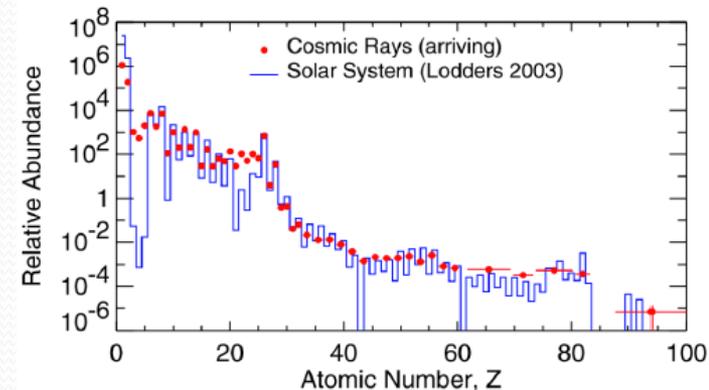
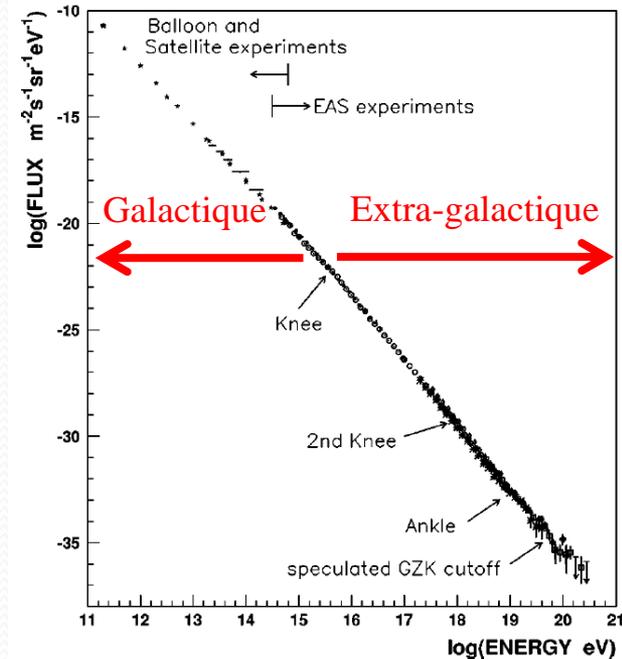
Références :

- Phys. Rev. Lett. 110, 14 (2013)
- Conférence ICRC 2013

LES RAYONS COSMIQUES

RAYONS COSMIQUES

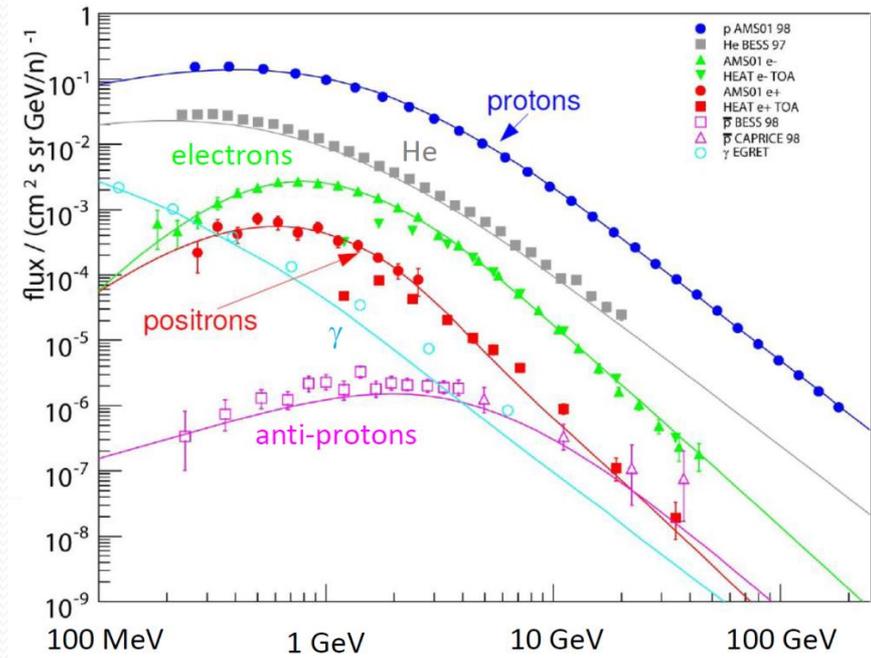
- **Rayonnement cosmique**
 - 12 ordres de grandeur **en énergie**
 - 100 MeV à 10^{20} eV
 - 30 ordres de grandeur **en flux**
 - Flux isotrope
- **Spectre en loi de puissance**
- **Provenance**
 - De l'extérieur du **système solaire**
 - $E < 10^{16}$ eV : de notre **Galaxie**
 - Ultra-hautes énergies : de l'**extérieur** de notre Galaxie
- **Composition**
 - **Chargé** : électrons, protons, noyaux
 - **Neutre** : photons, neutrinos
- **Abondance des noyaux dans les rayons cosmiques similaire à celle dans le système solaire**



RAYONS COSMIQUES

- Rayons cosmiques **chargés**

- 99 % de **nucléons**
 - Dont 89 % de **protons**, 10 % **hélium**, 1 % **noyaux** plus lourds
- **Electrons** 1 % et **positons** 0,1 %



- Spectre en loi de puissance $1/E^\gamma$, $\gamma = 2,7-3,5$

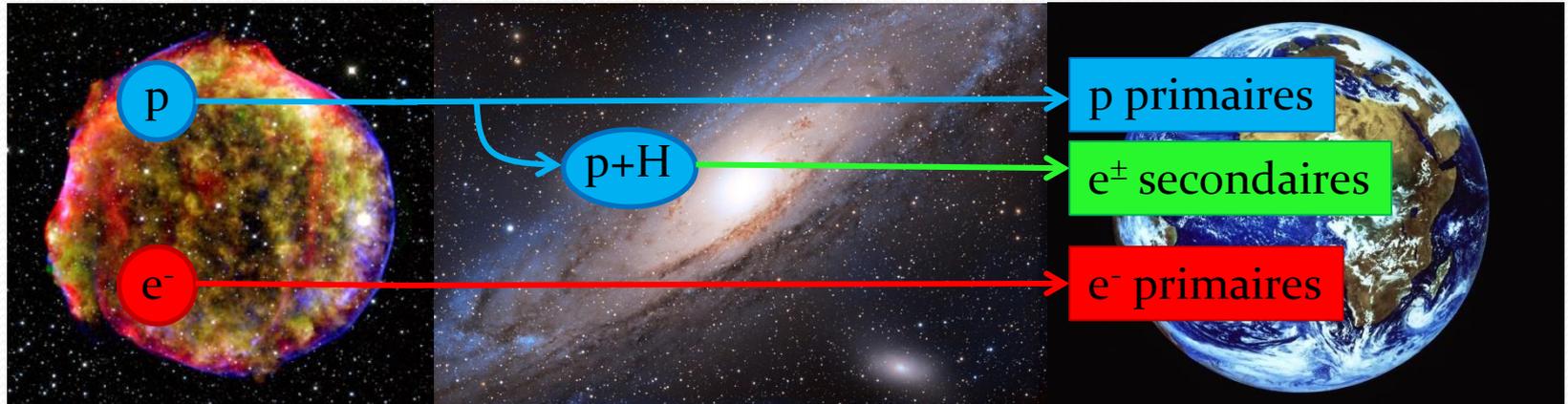
- Le spectre mesuré résulte
 - du mécanisme de **production** et **d'accélération** ($1/E^\alpha$, $\alpha = 2,0-2,4$)
 - du terme de **diffusion** ($1/E^\delta$, $\delta = 0,3-0,7$)
- $\gamma = \alpha + \delta$

RAYONS COSMIQUES

Production et
accélération

Propagation (diffusion)
dans la galaxie

Observation



- Rayons cosmiques **primaires**

- Produits directement par une **source**
- Sources : restes de **supernovas**, **pulsars**, **noyaux actifs** de galaxie, **quasars**, ...
- Rayons primaires
 - Électrons, protons, hélium, carbone, ...

- Rayons cosmiques **secondaires**

- Proviennent de l'**interaction** du rayonnement primaire sur le milieu interstellaire
- Rayons secondaires
 - Positons, antiprotons, bore, ...

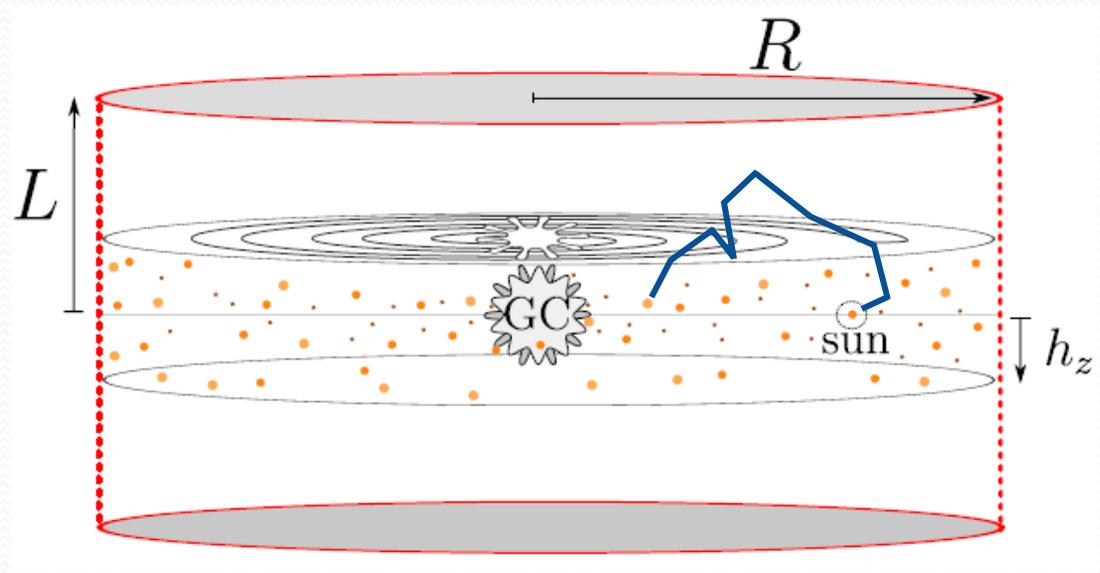
ACCÉLÉRATION

- Dans notre galaxie, **source principale** des rayons cosmiques primaires : **reste de supernovas**
 - Champs magnétiques très forts dans la **coquille** des supernovas
- **Accélération**
 - Due à l'**onde de choc**
 - Processus de **Fermi du premier ordre**
 - Va-et-vient continu dans le champ électrique et magnétique : gain en énergie
 - Produit naturellement un flux **en loi de puissance**
- Ce processus explique pourquoi la **composition** des rayons cosmiques est **similaire** à celle du système solaire



PROPAGATION

- Rayons cosmiques chargés : propagation équivalente à **une diffusion** dans le milieu galactique
 - **Champ magnétique irrégulier** du halo diffusif = marche au hasard
 - Coefficient de **diffusion** $K(E) = K_0 \beta R^\delta$ ($R=p/Z$)
 - Paramètres libres : K_0 , δ , L , V_c , V_a
 - Les incertitudes sur ces paramètres sont transcrits en **trois jeux de paramétrisations**
 - Min, Med, Max



$h_z=200$ pc, $L=1-15$ kpc, $R=25$ kpc

L'EXPERIENCE AMS-02

AMS-02

- Détecteur de **rayons cosmiques**
 - Particules **chargées** et rayons **gamma**
 - Entre **100 MeV** et **1 TeV**



5m x 4m x 3m
7,5 tonnes

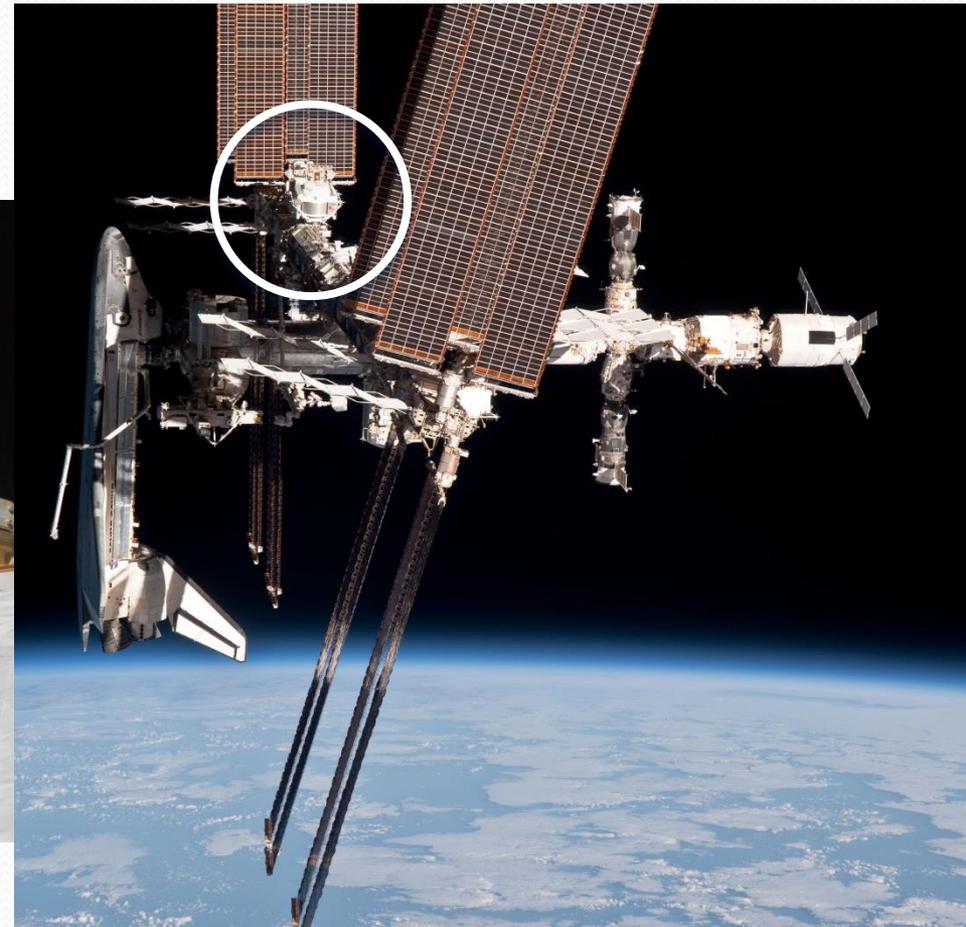
AMS-02

- **Décollage** de Cap Canaveral le 16 mai 2011
 - **Avant-dernière** navette américaine !



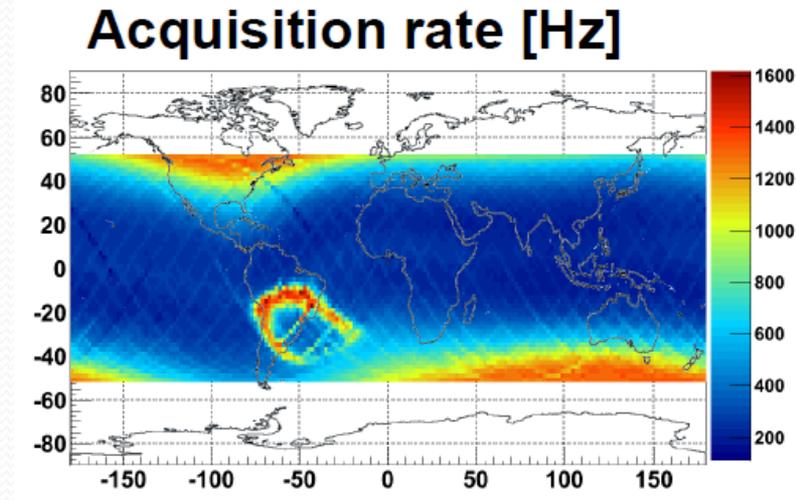
AMS-02

- Déploiement sur l'ISS le 19 mai 2011
 - En orbite à **400 km**
 - Une orbite toutes les **90 minutes**

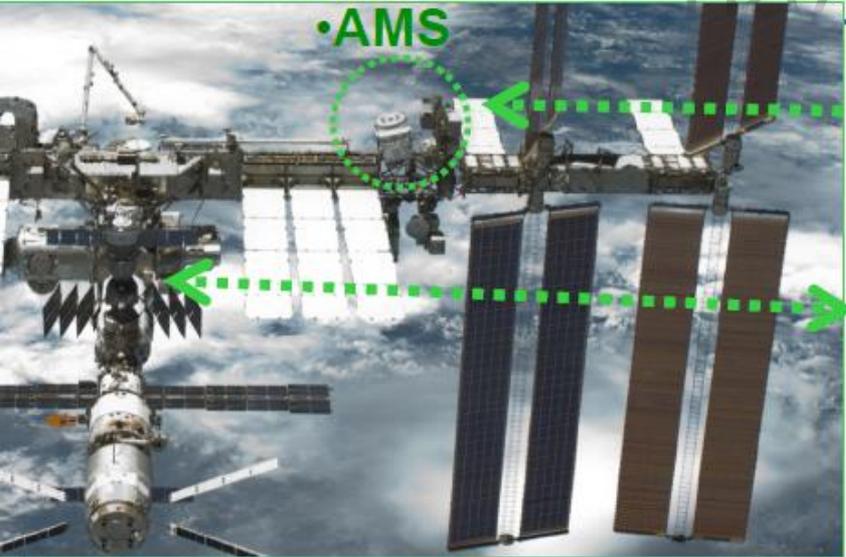


OPERATION EN VOL

- Taux d'acquisition de 200 à 2000 Hz
- Fonctionnement en continu 7j/7 24h/24 depuis plus de trois ans
- Acquisition
 - ~40 millions d'événement par jour
 - ~100 Go transférés par jour
 - 39 To de données par an
 - 200 To de données reconstruites par an
- 50 milliards d'événements enregistrés depuis mai 2011
- Prévu pour opérer jusqu'en 2020 et plus
 - Analyses présentées ici = 10 % des données totales prévues



TRANSMISSION



•AMS



TDRS Satellites



Astronaut at ISS AMS Laptop

Ku-Band
High Rate (down):
Events <10Mbit/s

S-Band
Low Rate (up & down):
Commanding: 1 Kbit/s
Monitoring: 30 Kbit/s



AMS Payload Operations Control and
Science Operations Centers
(POCC, SOC) at CERN since June 2011



AMS Computers
at MSFC, AL

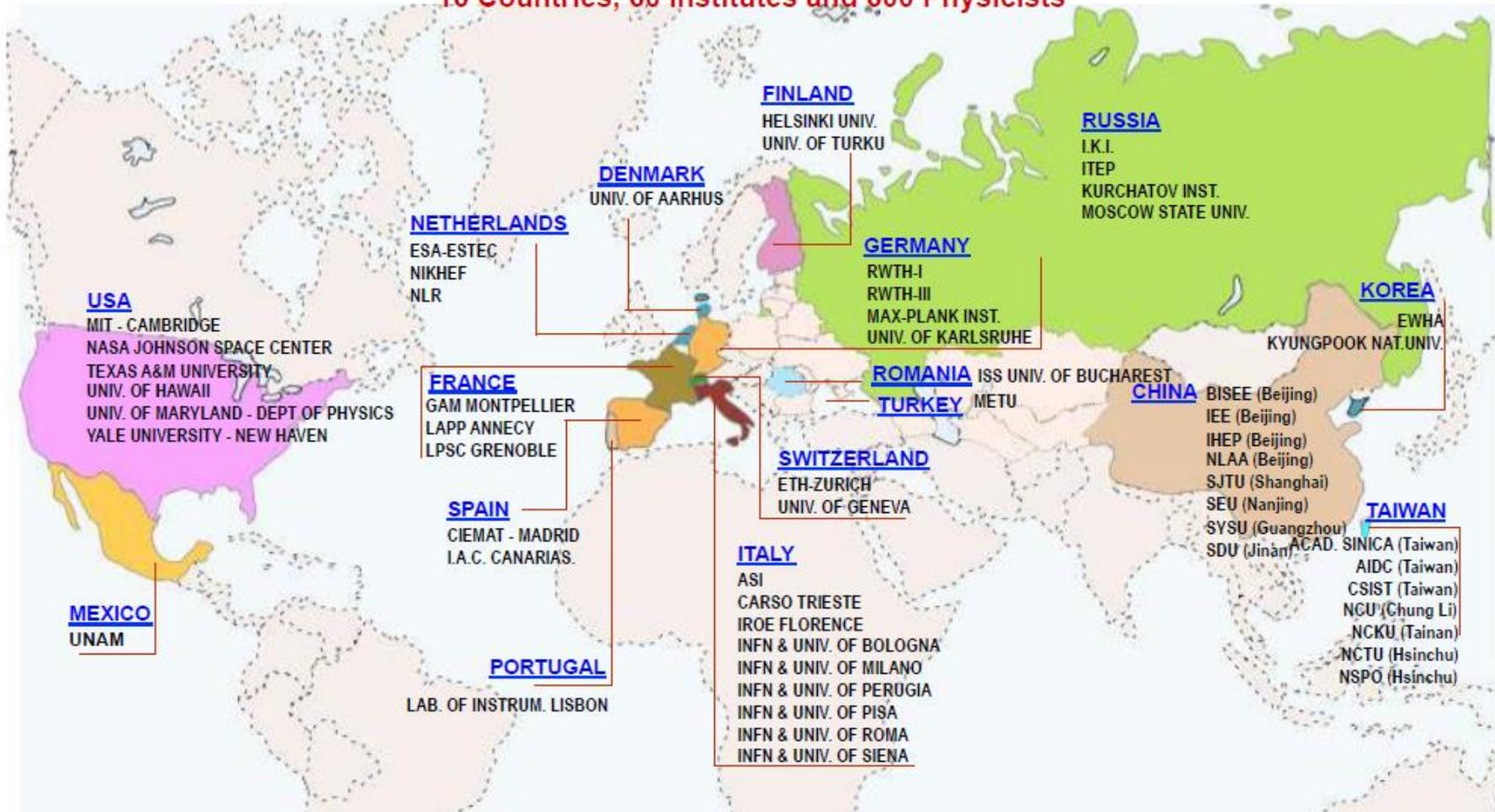


White Sands Ground
Terminal, NM

COLLABORATION

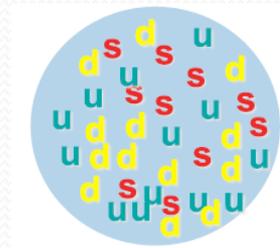
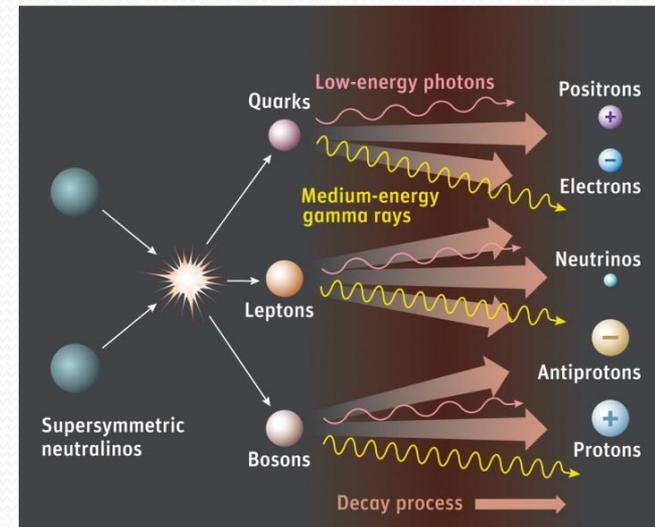
AMS: a U.S. DOE sponsored international collaboration

16 Countries, 60 Institutes and 600 Physicists



OBJECTIFS D'AMS

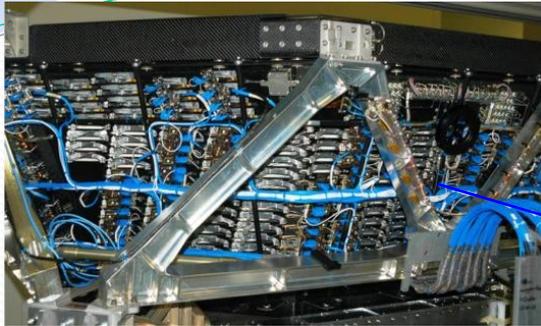
- Mesures de **flux de rayons cosmiques**
 - Comprendre la **propagation** des rayons cosmiques dans notre Galaxie
- Recherche indirecte de **matière noire**
 - En particulier **positons** et **antiprotons** produits lors de son annihilation
- Recherche d'**antimatière primordiale**
 - **Anti-hélium** relique du Big-Bang ou **anti-carbone** issus d'anti-étoiles
- Surprises? **Strangelets?**



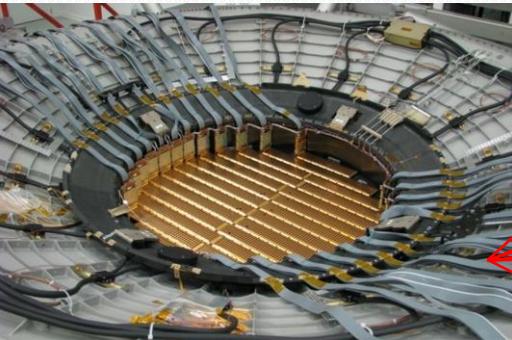
Détecteur à radiation
de transition
Identifie les e^+ , e^-

DÉTECTEUR

Temps de vol
 Z, E



Trajectomètre au silicium
 Z, P



Calorimètre EM
 E des e^+ , e^- , γ



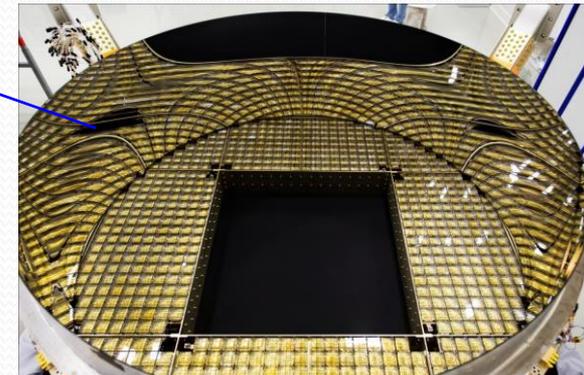
Rayons cosmiques



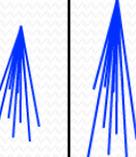
Aimant 0,14 T
 $\pm Z$



RICH
 Z, E

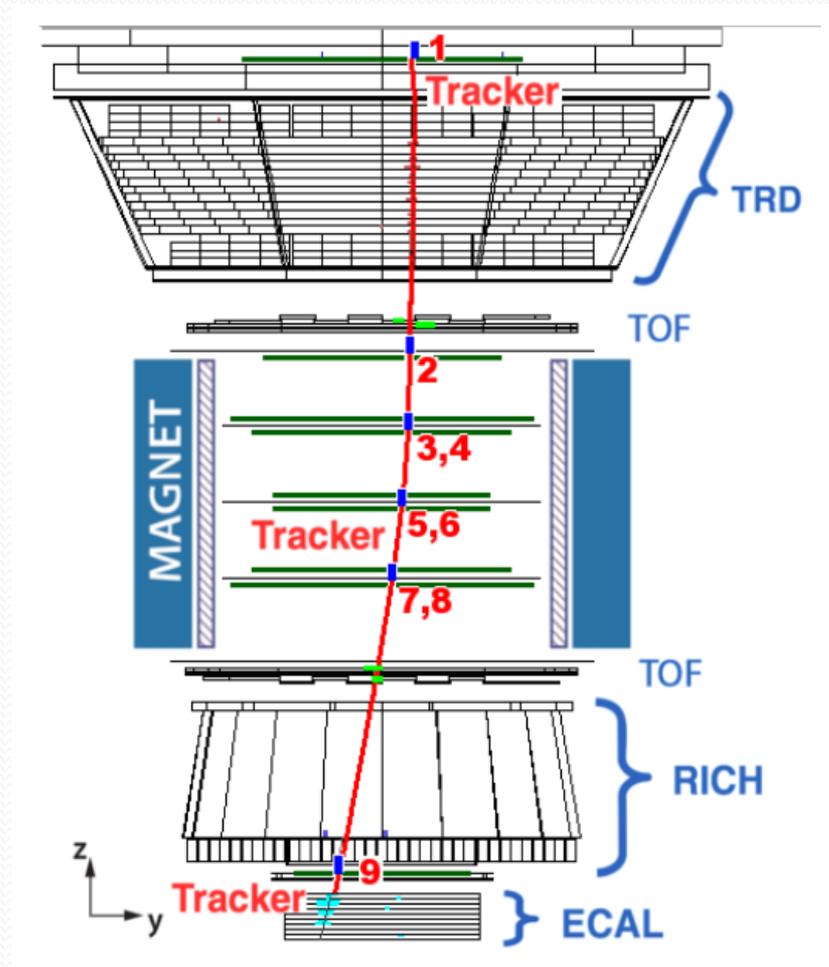


DÉTECTEUR

	e^-	P	He, Li, Be, ... Fe	γ	e^+	\bar{P}, \bar{D}	\bar{He}, \bar{C}
TRD							
TOF							
Tracker							
RICH							
ECAL							
Physics example	Cosmic Ray Physics				Dark matter		Antimatter

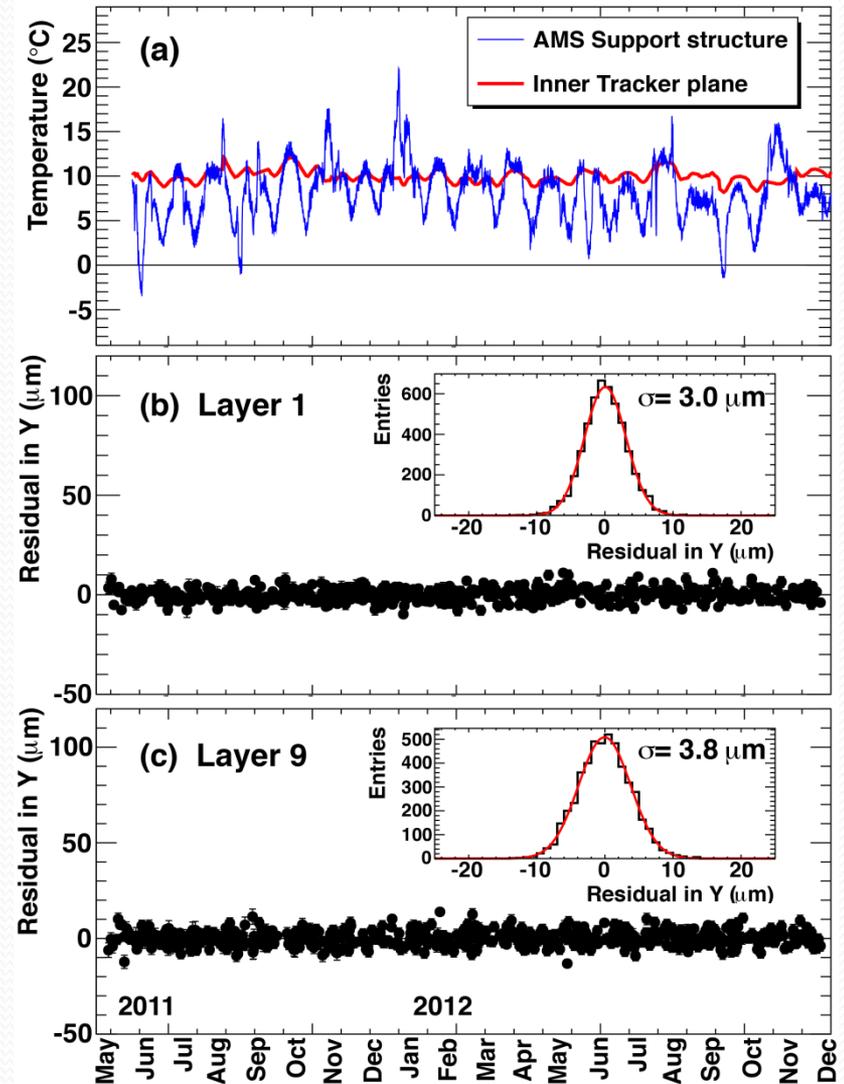
DÉTECTEUR

- Exemple d'événement
- Rigidité
 - $R = p/Z$
- Difficultés
 - **Alignement** des plans du fait des variations de températures



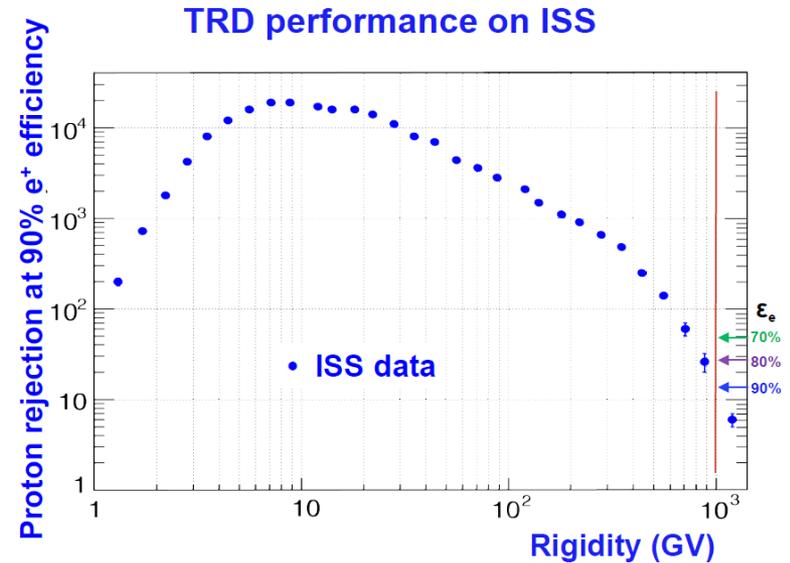
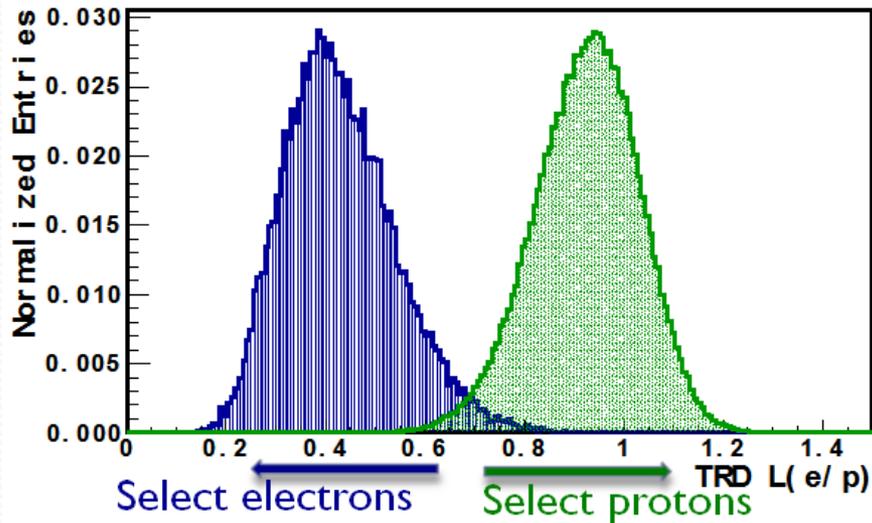
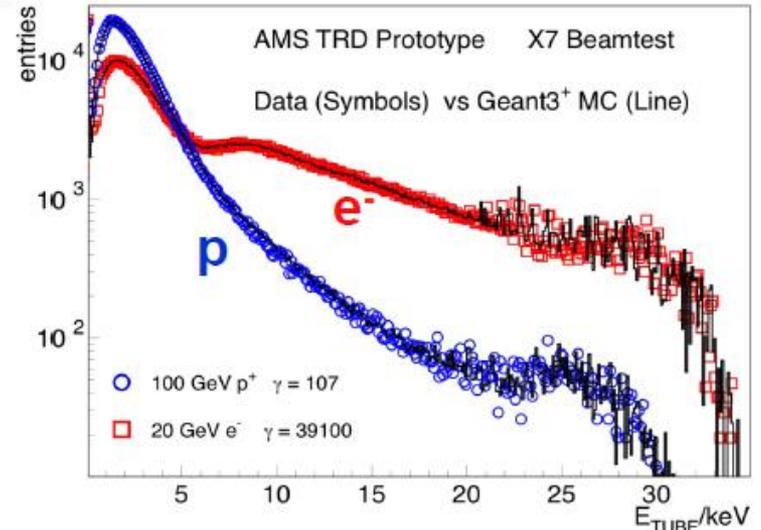
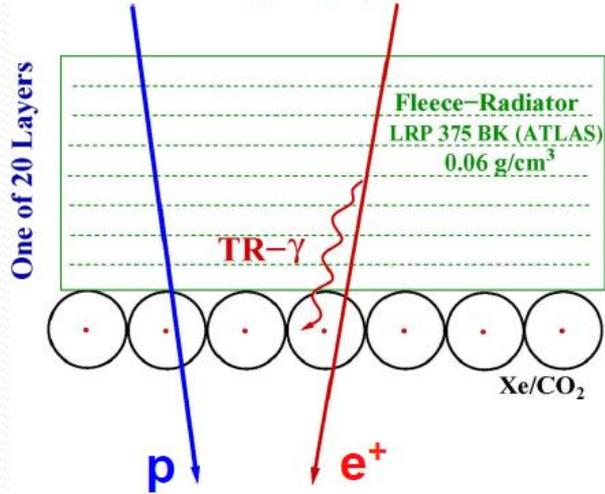
TEMPERATURES

- Plans extérieurs du trajectographe subissent des écarts de température
 - Engendre des déplacements des plans de $100\ \mu\text{m}$
- Ces déplacements sont suivis grâce aux rayons cosmiques
 - Précision de $3\text{-}4\ \mu\text{m}$

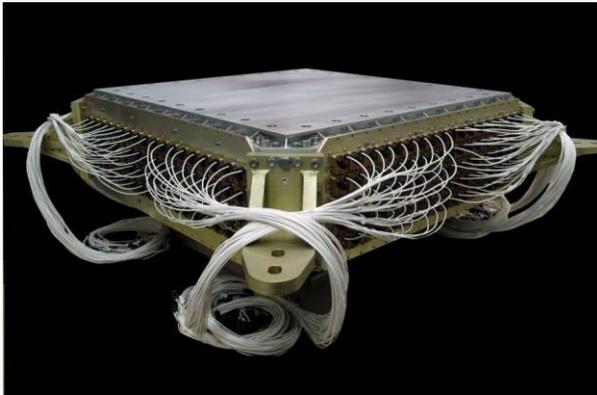


PERFORMANCE DU TRD

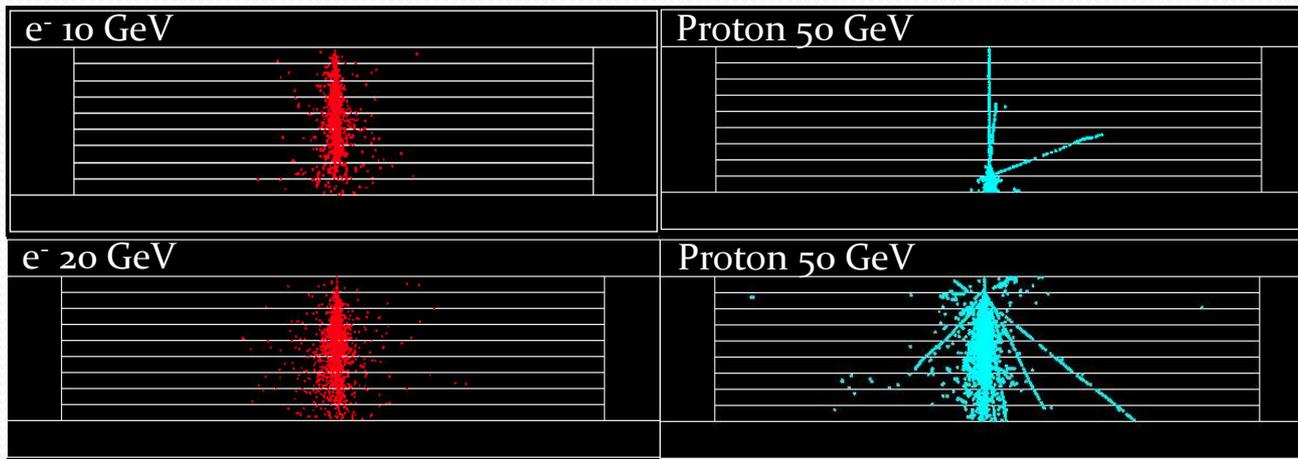
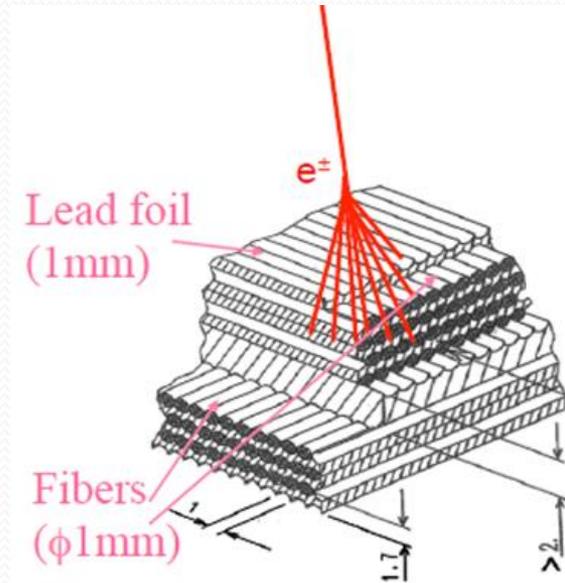
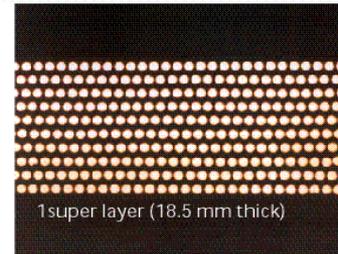
Identify e^+ , reject P



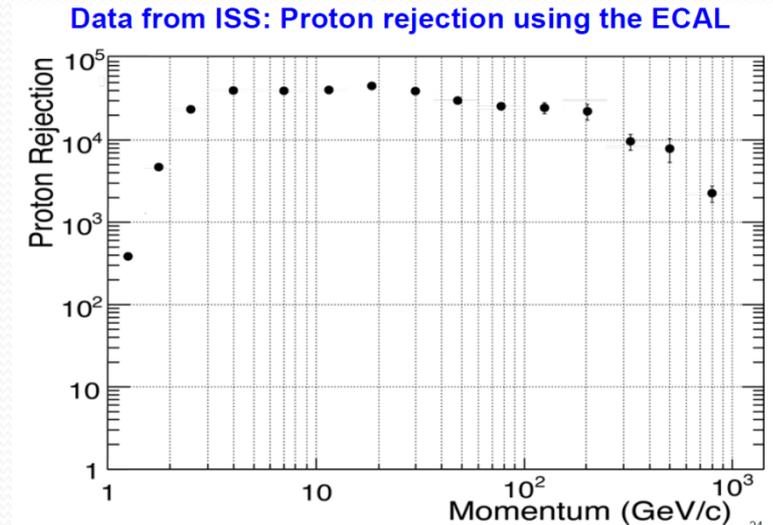
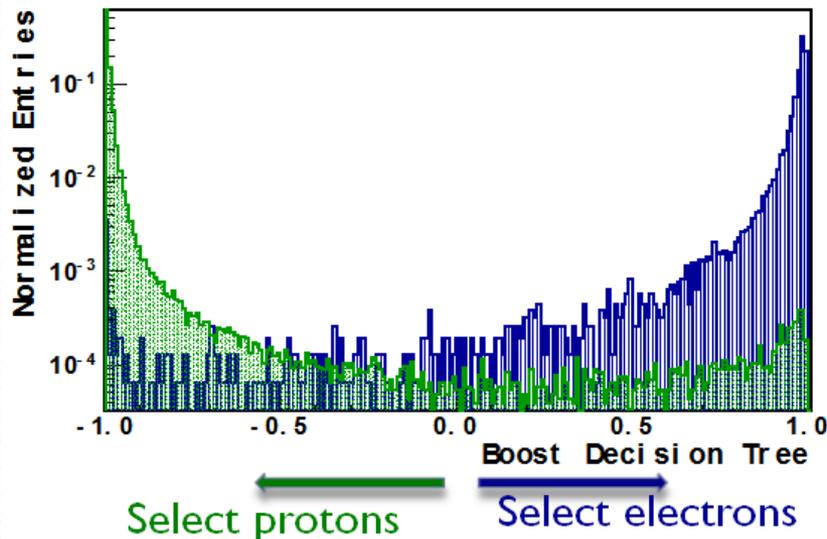
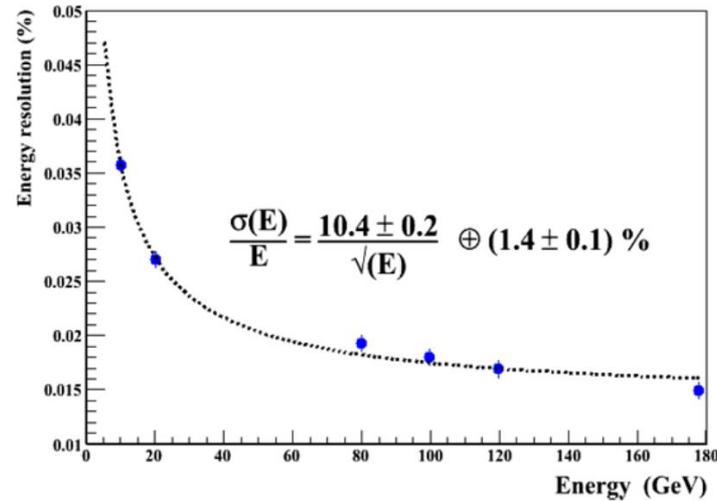
PERFORMANCE ECAL



- Calorimètre à échantillonnage
- Structure en plomb et fibres scintillantes (50 000)
- Poids : 498 kg
- 17 X0



PERFORMANCE ECAL



FRACTION DE POSITIONS

FRACTION DE POSITONS

- **Positons** : prévus uniquement d'origine secondaire
- Excès de positons par rapport à la prédiction des secondaires = source de positons primaires

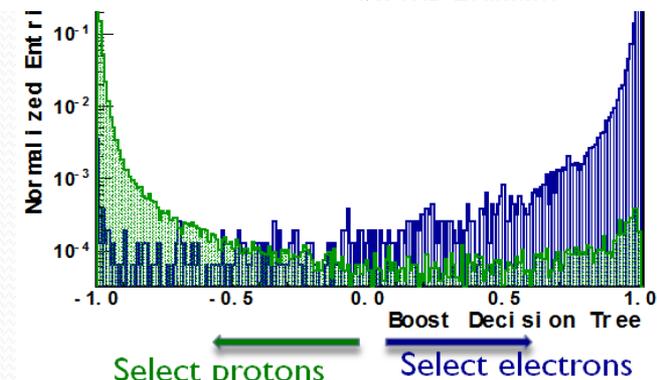
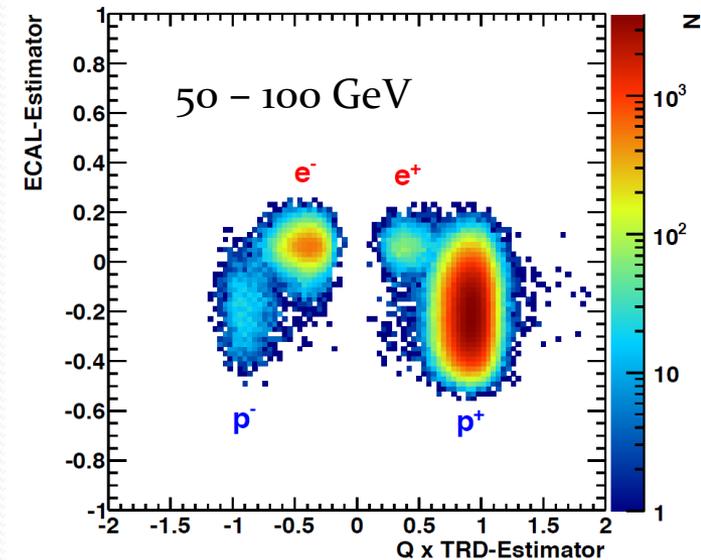
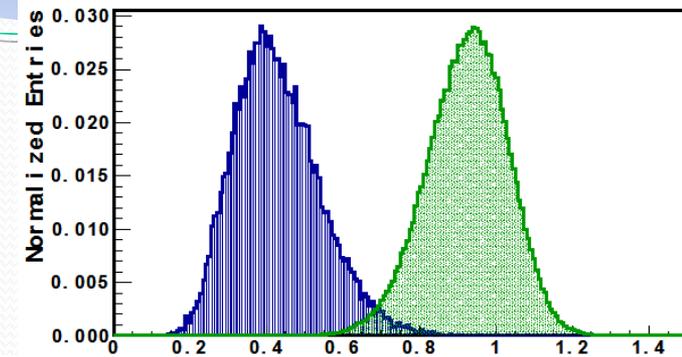
- **Fraction de positons**

$$F = \frac{\Phi_{e^+}}{\Phi_{e^+} + \Phi_{e^-}} = \frac{N_{e^+}}{N_{e^+} + N_{e^-}}$$

- Permet de **factoriser** les acceptances et efficacités
 - **Simplifie** les erreurs systématiques
- **Quelles difficultés ?**
 - **100 fois** plus de protons que d'électrons
 - **2000 fois** plus de protons que de positons
- ⇒ Diviser le nombre de protons par un **facteur 10⁶**

FRACTION DE POSITONS

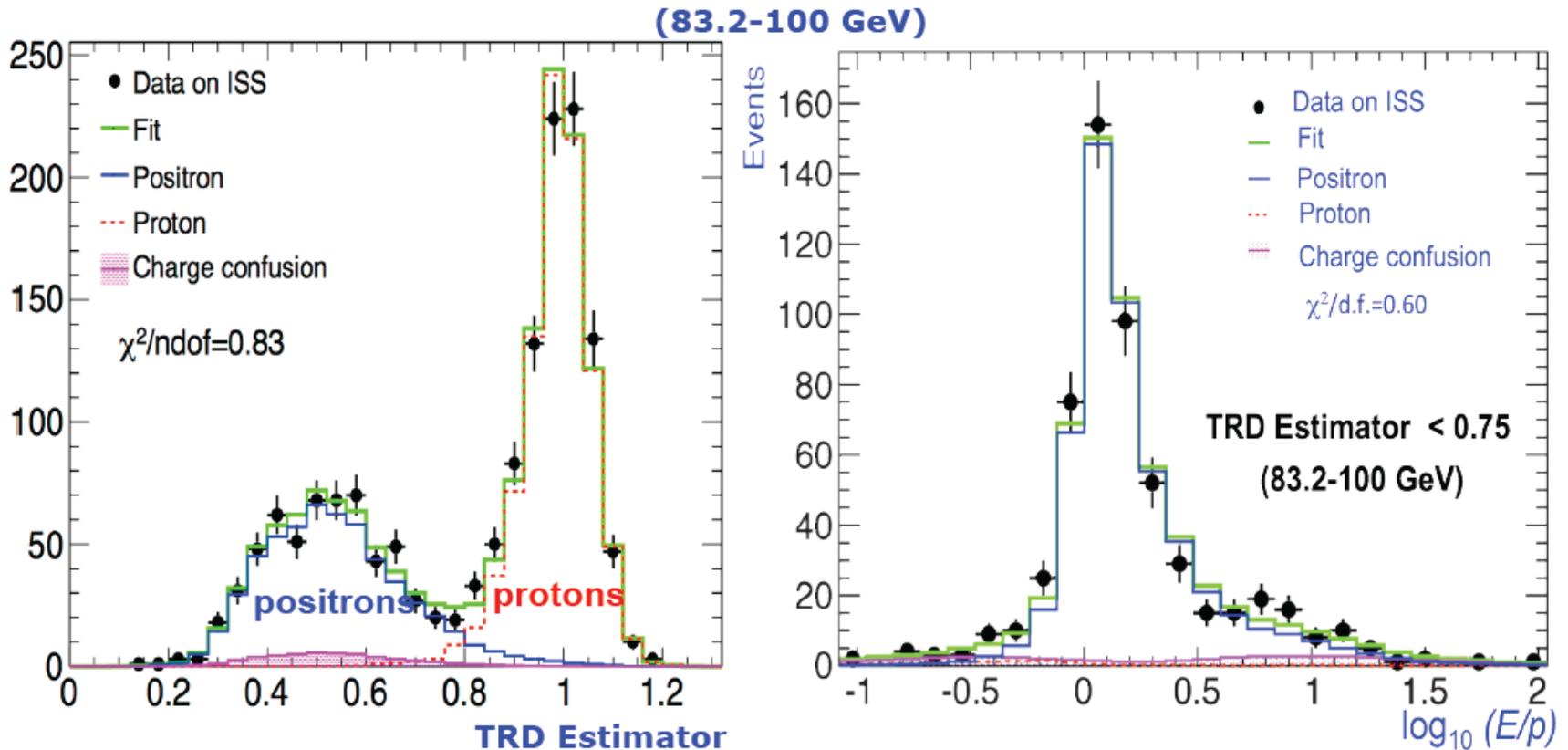
- Les **sous-détecteurs clés** pour cette mesure
 - Le détecteur à **transition de radiation**
 - Basée sur l'amplitude du signal pour chacune des 20 couches du TRD
 - Le **trajectographe**
 - E/p proche de 1 pour les électrons/positons, < 1 pour les protons
 - Le **calorimètre électromagnétique**
 - Basée sur la forme en 3D de la gerbe
- Le **principe de la mesure**
 - **Sélection** à partir de la variable du calorimètre
 - **Comptage** des e^+ ($Z > 0$) ou e^- ($Z < 0$) à partir d'un fit 2D sur les deux autres variables
 - Estimation pour **chaque intervalle en énergie**



FRACTION DE POSITONS

- **Comptage des leptons après sélection**

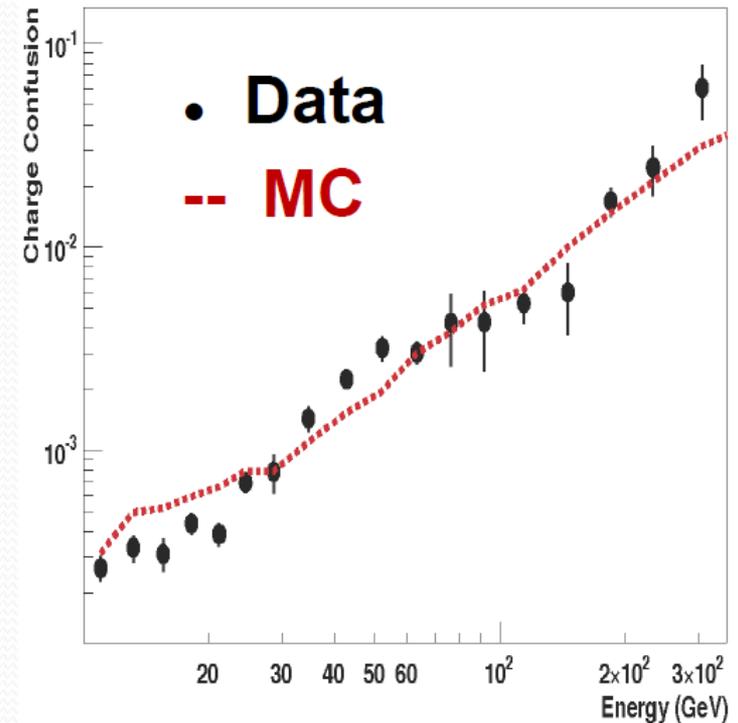
- **$Z > 0$** : comptage des **positons**



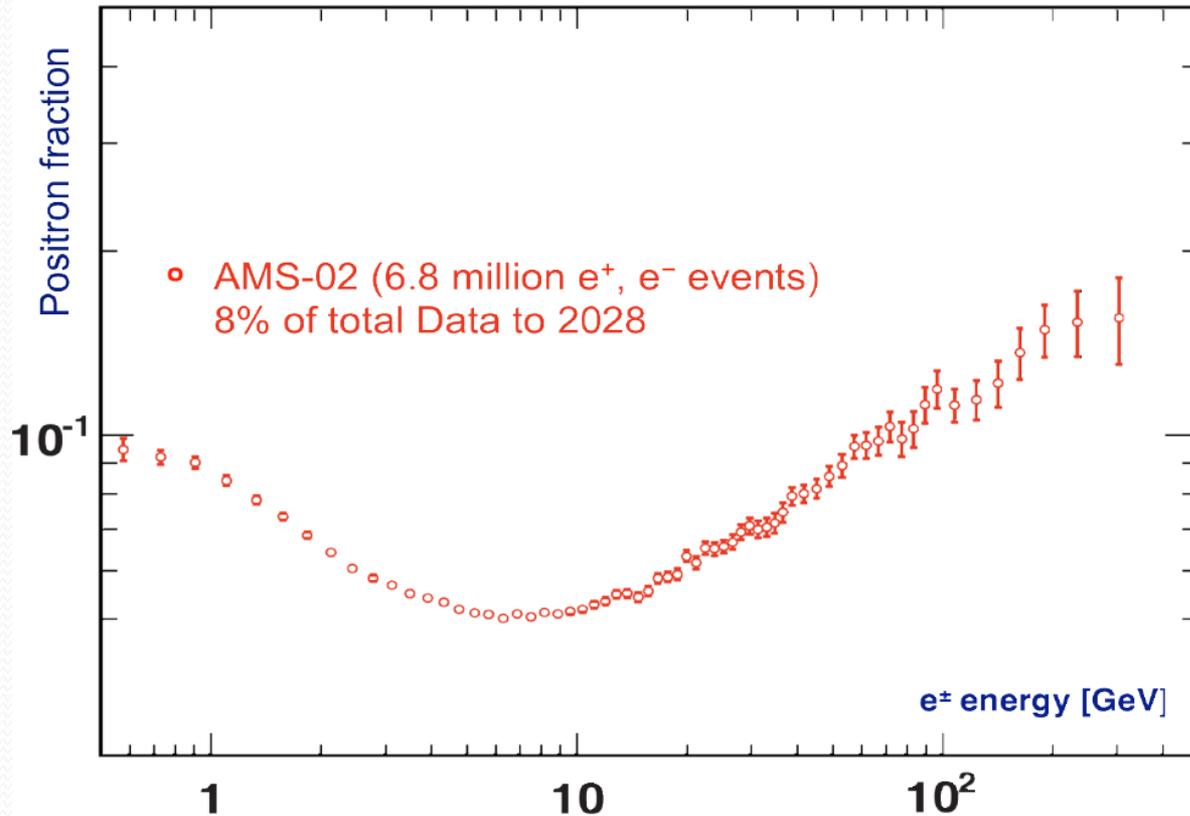
- **$Z < 0$** : comptage des **électrons**

FRACTION DE POSITONS

- Confusion de **charge**
 - Pour certaines énergies, **signe de la charge** difficilement mesurable \Rightarrow confusion
 - 4 % à 350 GeV \Rightarrow **corrigé** grâce au MC
- Deux **sources**
 - **Diffusions multiples** et résolution du trajectographe
 - **Traces secondaires** produites le long de la trace du lepton primaire



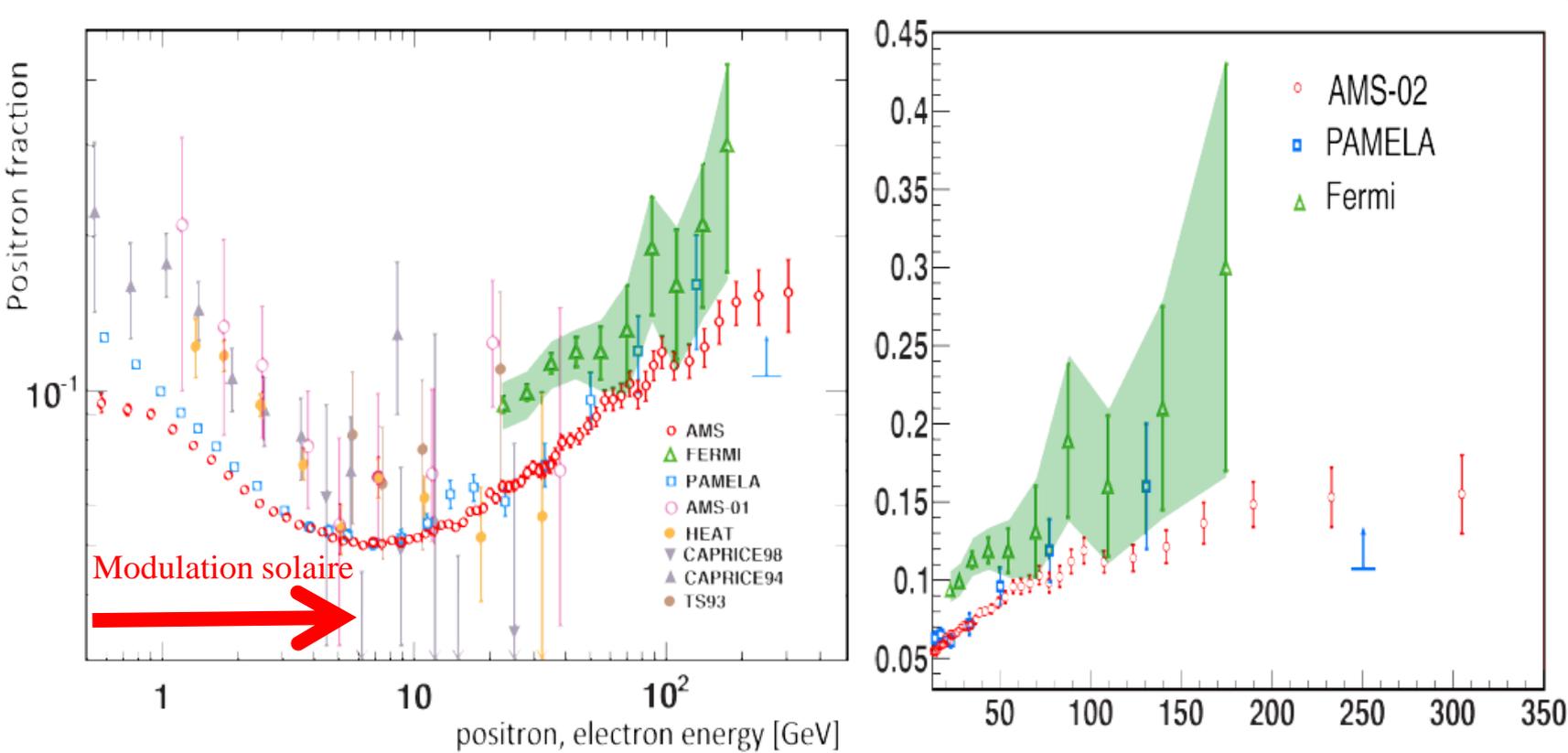
FRACTION DE POSITONS



- Fraction de positons **augmente** de 10 à ~ 250 GeV
 - Après 20 GeV, la **pente diminue** d'un facteur 10
- Pas de **structure fine** dans le spectre

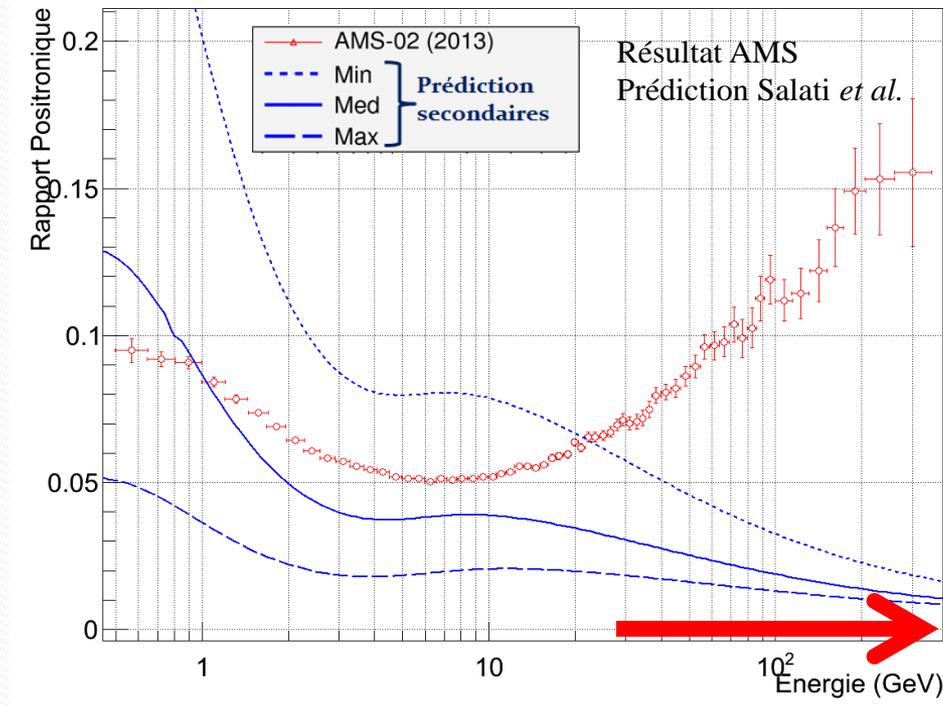
FRACTION DE POSITONS

- Comparaison avec les autres expériences



FRACTION DE POSITONS

- **Prédiction théorique** de la fraction de positons
 - Positons naturellement produits par les rayons cosmiques par **spallation**



Source de positons nécessaire !

- **Au-delà de 10 GeV, remontée observée** pour la fraction de positons
 - **Incompatible** avec production des secondaires
 - Une **source de positons** primaires est nécessaire !
- **Quelle est la source de positons ?**
 - Celle-ci est **proche** car les positons ne se propagent pas plus que **quelques kpc**

FRACTION DE POSITONS

- Fit des données avec un **modèle minimal**

- Positons

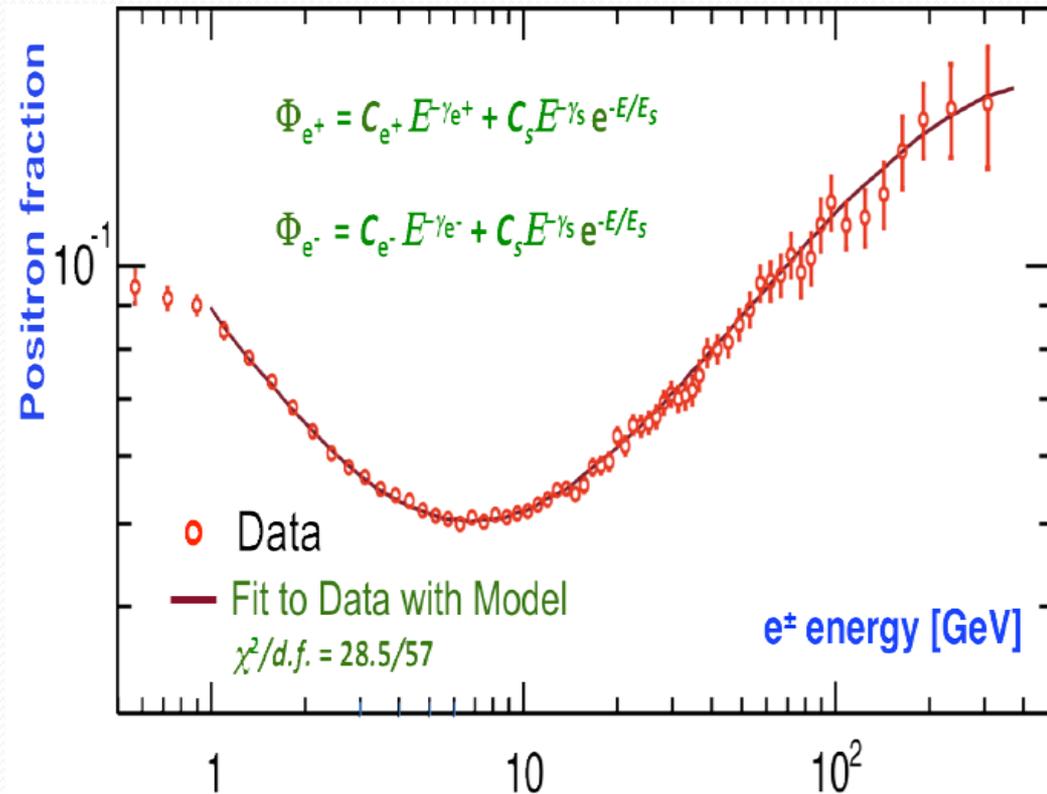
- Flux secondaire
- + source

$$\Phi_{e^+} = C_{e^+} E^{-\gamma_{e^+}} + C_s E^{-\gamma_s} e^{-E/E_s}$$

- Electrons

- Flux primaire et secondaire
- + même source

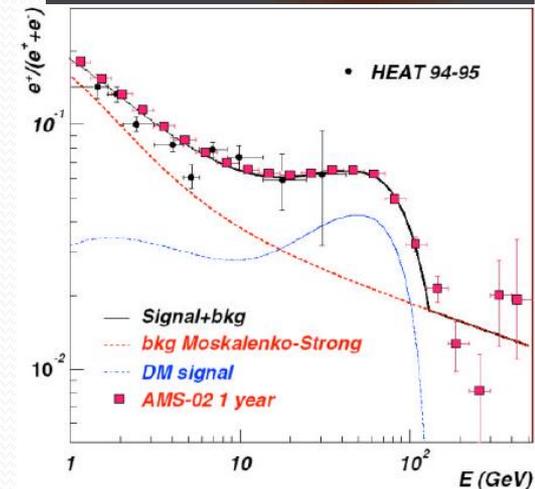
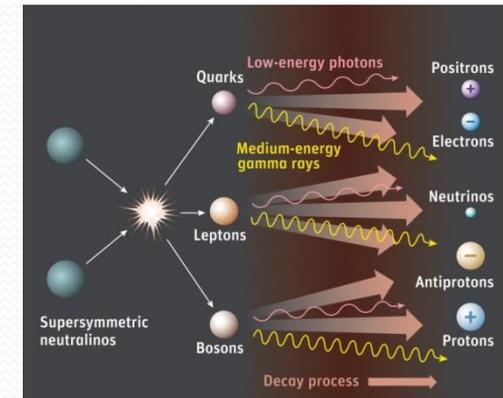
$$\Phi_{e^-} = C_{e^-} E^{-\gamma_{e^-}} + C_s E^{-\gamma_s} e^{-E/E_s}$$



- Le fit est **satisfaisant**, ce qui montre que les données peuvent être décrites par une **source e^+/e^- commune**

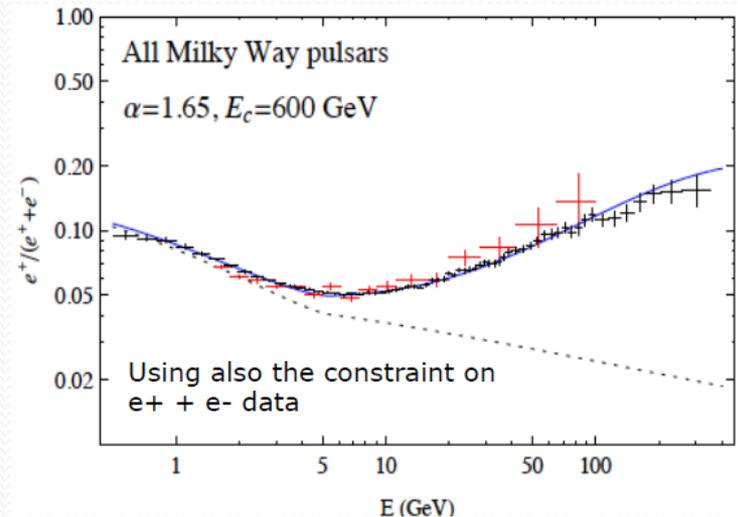
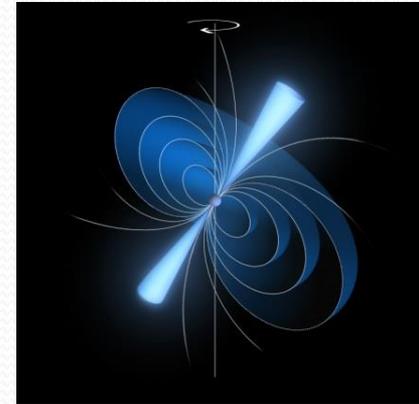
INTERPRÉTATION : MATIÈRE NOIRE

- **Matière noire** = 26 % du contenu de l'univers
 - « **Observation** » : courbe de rotation de galaxies, émission en rayons X, effets de lentilles gravitationnelles
 - **Meilleur candidat** : particule massive et interagissant très faiblement \Rightarrow **WIMP**
- **Annihilation de matière noire dans notre Galaxie**
 - **Annihilation** des WIMPs \Rightarrow production **particules-antiparticules** \Rightarrow source de positons
 - **Visible** dans la fraction et le flux de positons
- **Prédiction du taux de production et du flux**
 - Prédiction du flux doit être multipliée par un **facteur d'amplification** (>100) pour rendre compte de l'excès
- **Peu probable** qu'AMS ait observé une **manifestation indirecte** de la matière noire

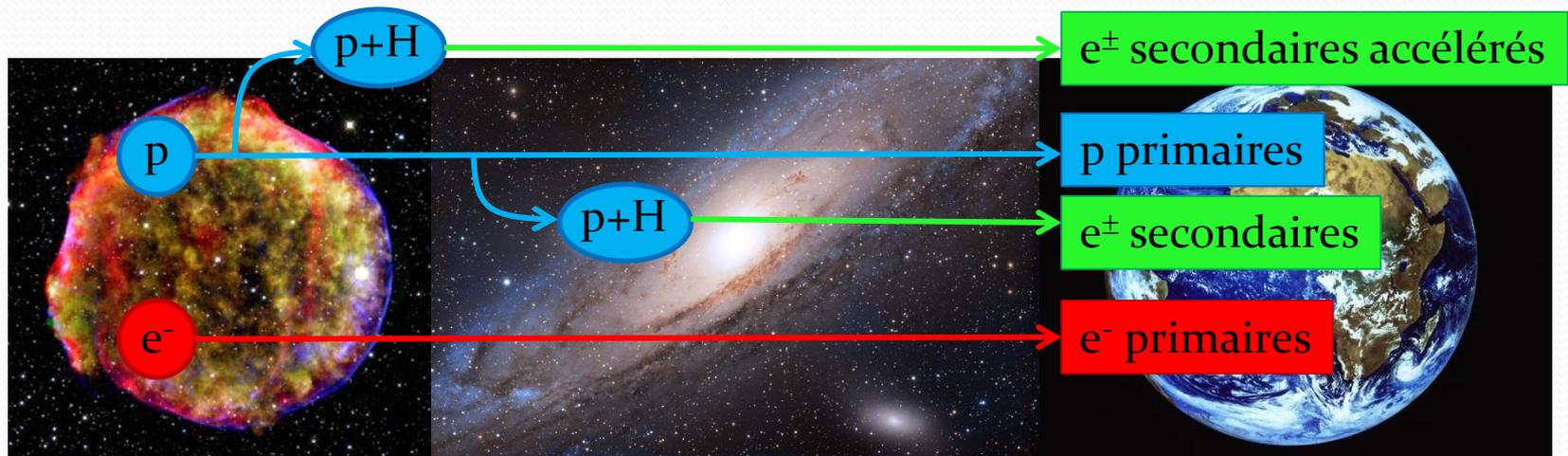


INTERPRÉTATION : PULSARS

- **Étoiles à neutrons** tournant sur elles-mêmes à grande vitesse avec un fort **champ magnétique**
- **200 pulsars** à moins de 2 kpc de la Terre
 - Seulement **un petit nombre** capable d'émettre des positons
- **Mécanisme**
 - **Électrons arrachés** de la surface par les champs forts
 - ⇒ électrons produisent des **photons synchrotron**
 - ⇒ photons produisent **paires e^+e^-**
 - ⇒ certains **s'échappent** du pulsar
- **Prédiction précise très difficile**
- **Points clés**
 - Mesurer séparément **les flux** de e^+ et e^-
 - Mesurer **l'anisotropie**
 - Direction privilégiée ?



INTERPRÉTATION : ACCÉLÉRATION SECONDAIRES



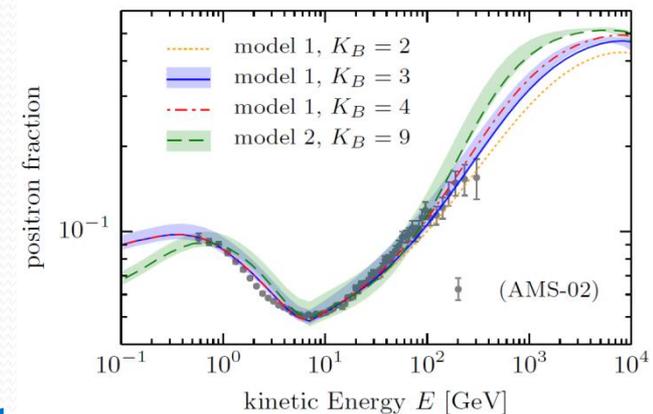
- Production et accélération des secondaires dans les restes de supernovas [arxiv:1402.0855](https://arxiv.org/abs/1402.0855)

- Conséquences

- Augmentation à haute énergie

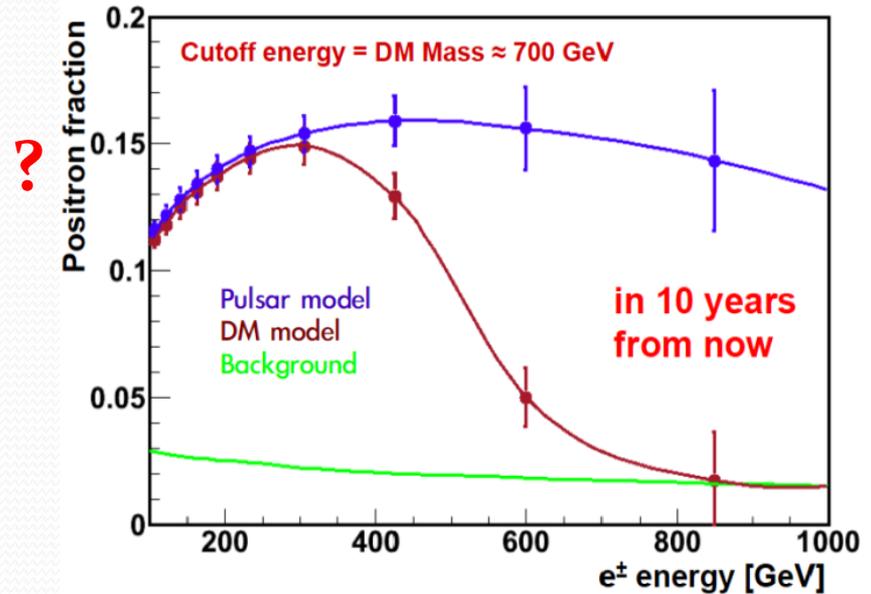
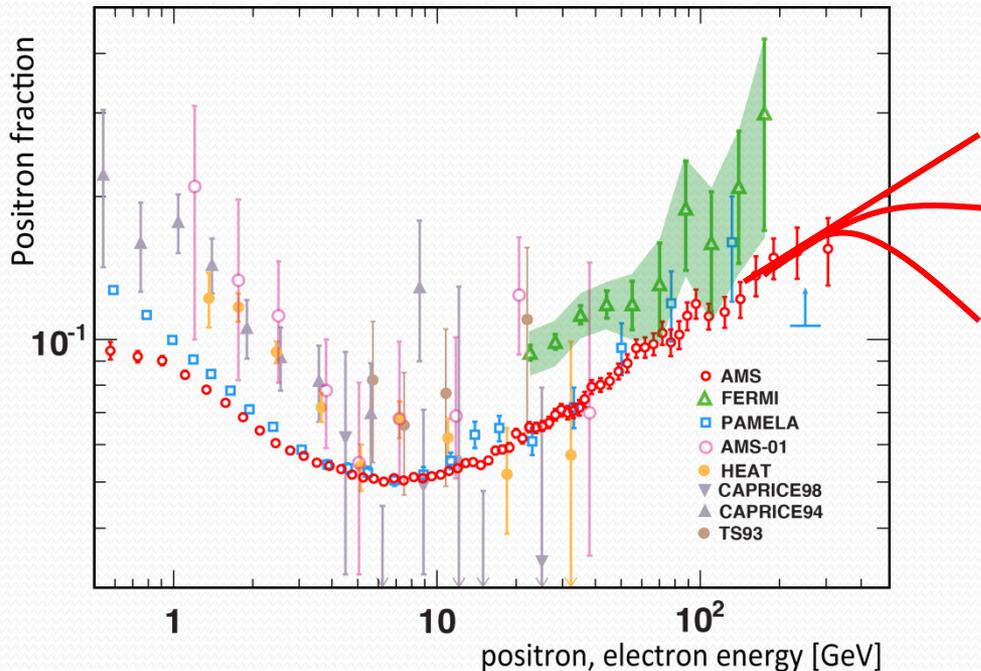
- de la fraction de positons
- des antiprotons
- du bore

- Prédiction vérifiable dans un futur proche



FRACTION DE POSITONS

- Il faut maintenant mesurer à plus haute énergie
 - Le flux diminuant en $1/E^3$, il faut accumuler beaucoup de statistique pour obtenir une réponse jusqu'à 1 TeV
 - La fraction monte-t-elle, reste-t-elle constante ou redescend-elle ??
- Information importante par rapport aux différents modèles
 - Permet de discriminer entre matière noire et pulsars



FLUX D'ELECTRONS ET DE POSITONS, ET ANISOTROPIE

FLUX D'ELECTRONS ET POSITONS

- Les flux apportent plus d'information pour les modèles que la fraction

- On obtient le flux via

$$\frac{N}{A \times \varepsilon_{Trig.} \times \varepsilon_{sel.} \times T \times dE}$$

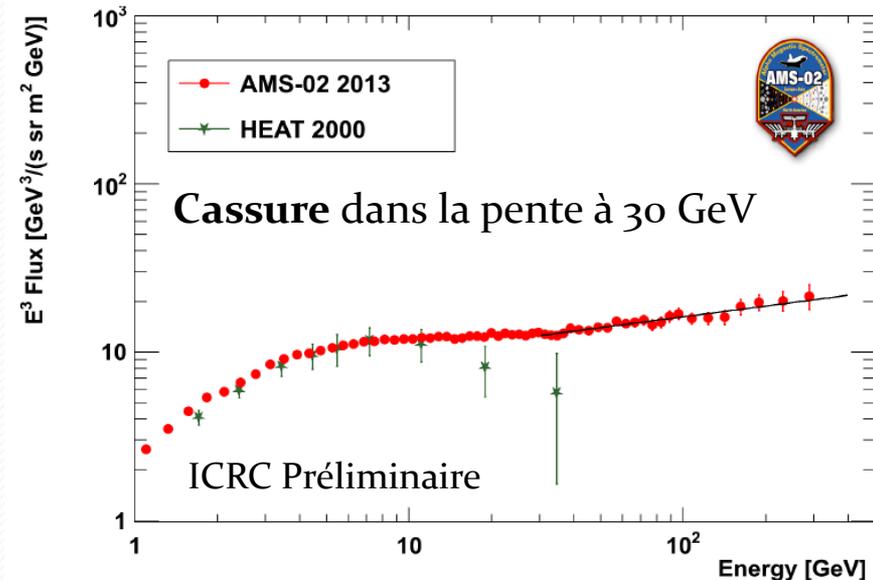
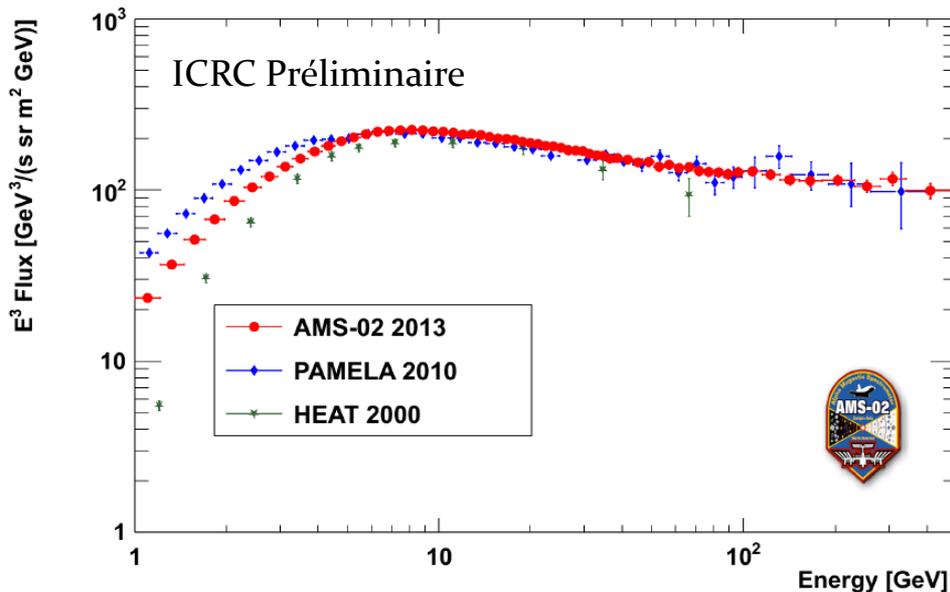
- A **acceptance**, $\varepsilon_{Trig.}$ et $\varepsilon_{sel.}$

efficacités du trigger et de la sélection, T **temps** d'exposition

Flux d'électrons

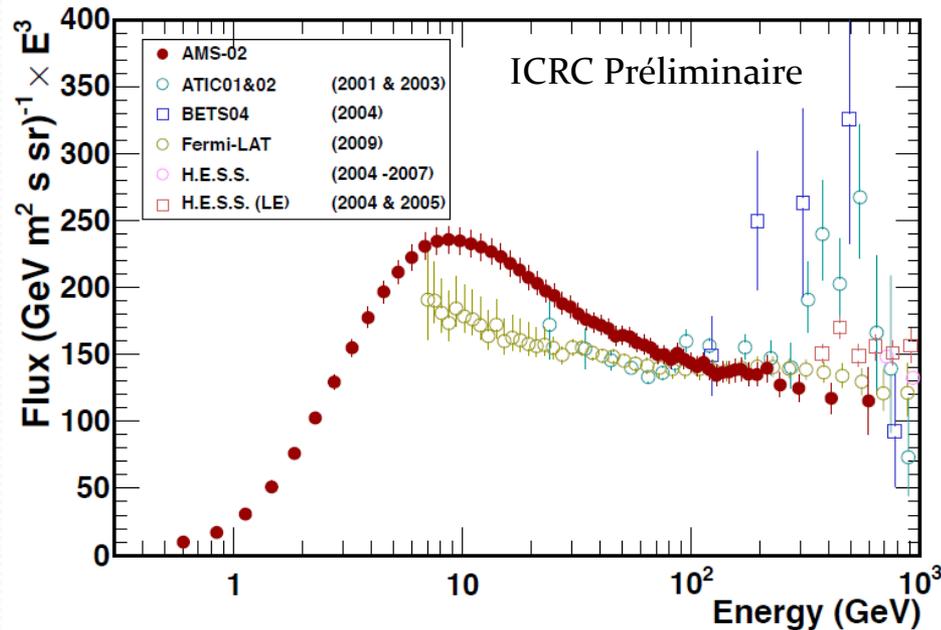
Flux multipliés par E^3

Flux de positons



FLUX D'ÉLECTRONS ET POSITONS

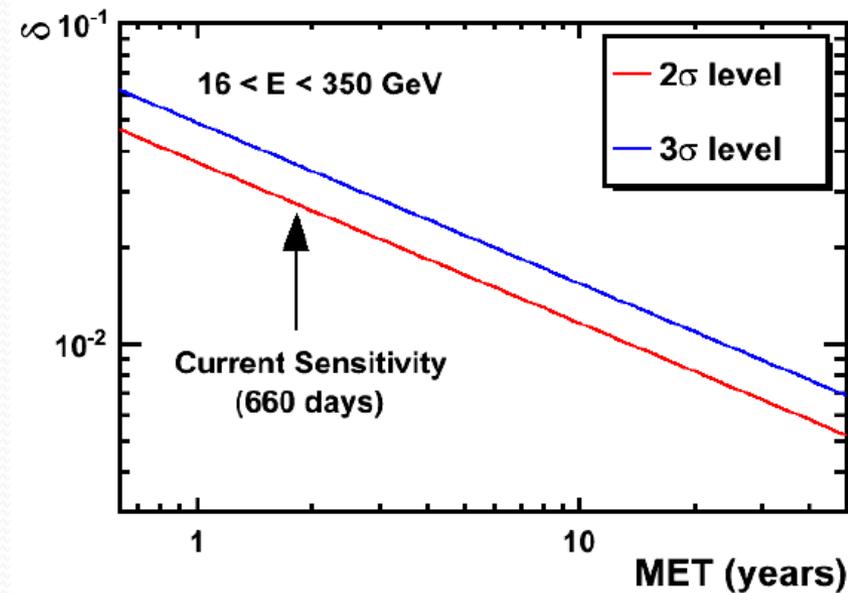
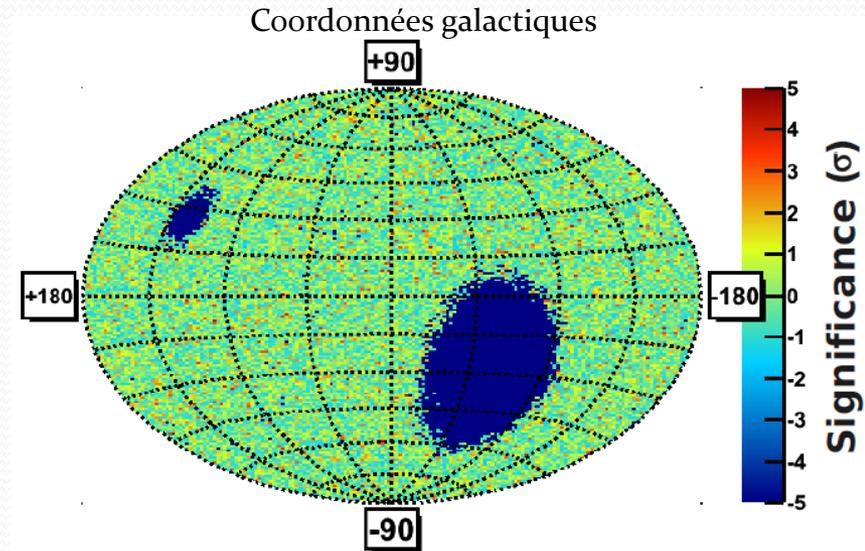
Flux de la somme d'électrons et de positons ($\times E^3$)



- Pour la **somme des flux**, désaccord net avec
 - La mesure de **Fermi** à 10-100 GeV
 - Les structures vues à **hautes énergies**
- **Souligne l'importance** de ces mesures d'AMS
 - AMS mesurera avec une résolution de **2 %** en énergie à 1 TeV

ANISOTROPIE DES POSITONS

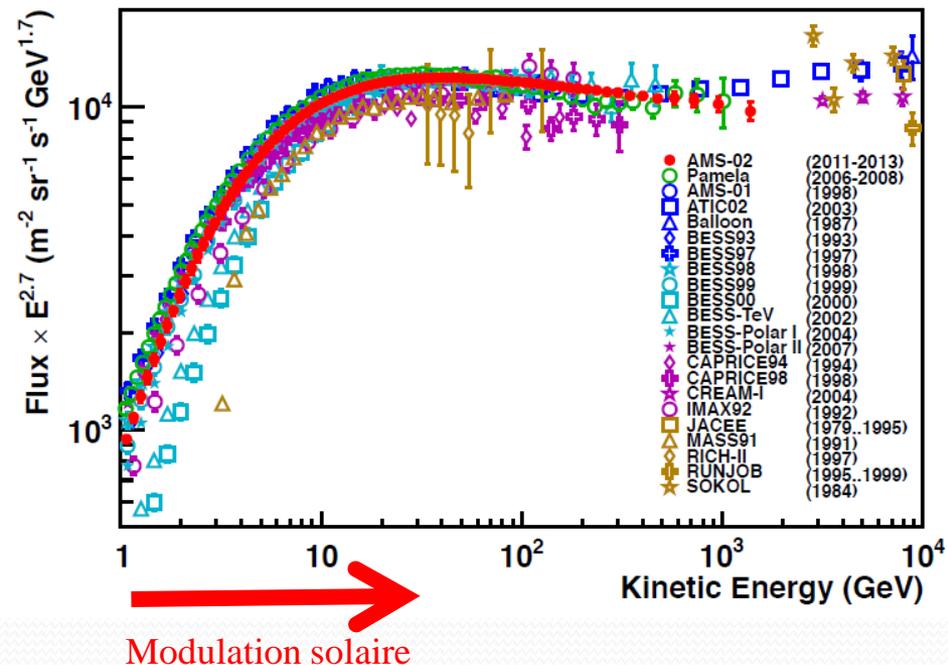
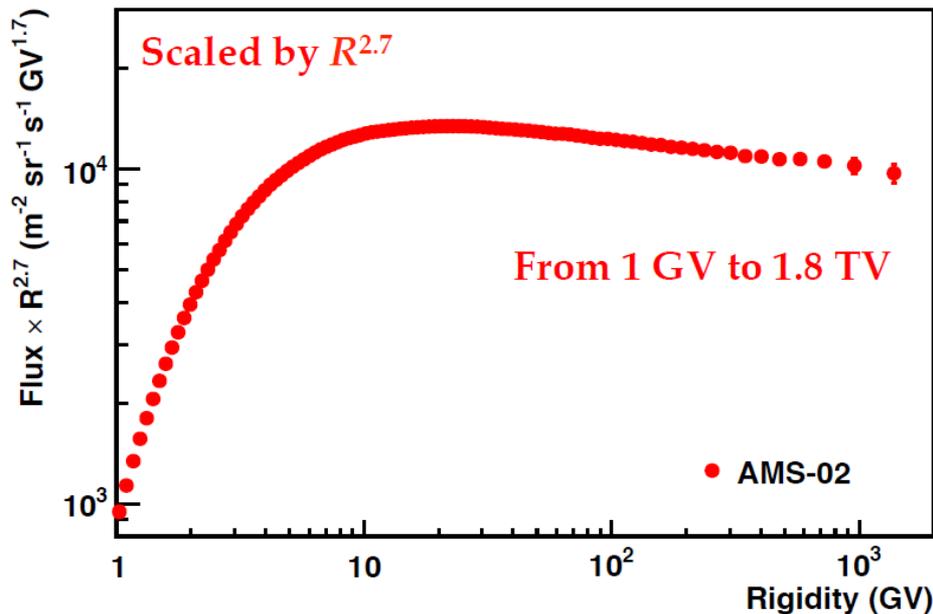
- Les observations montrent l'existence d'un **nouveau phénomène** créant des positons
 - Cette **nouvelle source** peut induire une **anisotropie** des positons
- AMS : les fluctuations relatives de la fraction de positons ne montrent **pas d'anisotropie significative**
- Limite sur le paramètre d'anisotropie dipolaire
 - $\delta < 0,030$ pour $16 < E < 350$ GeV
- Dans **10 ans**, AMS sera sensible à 3σ à $\delta = 0,014$
 - **Contraintes fortes** sur les **pulsars**



FLUX DE PROTONS ET DE NOYEAUX D'HELIUM

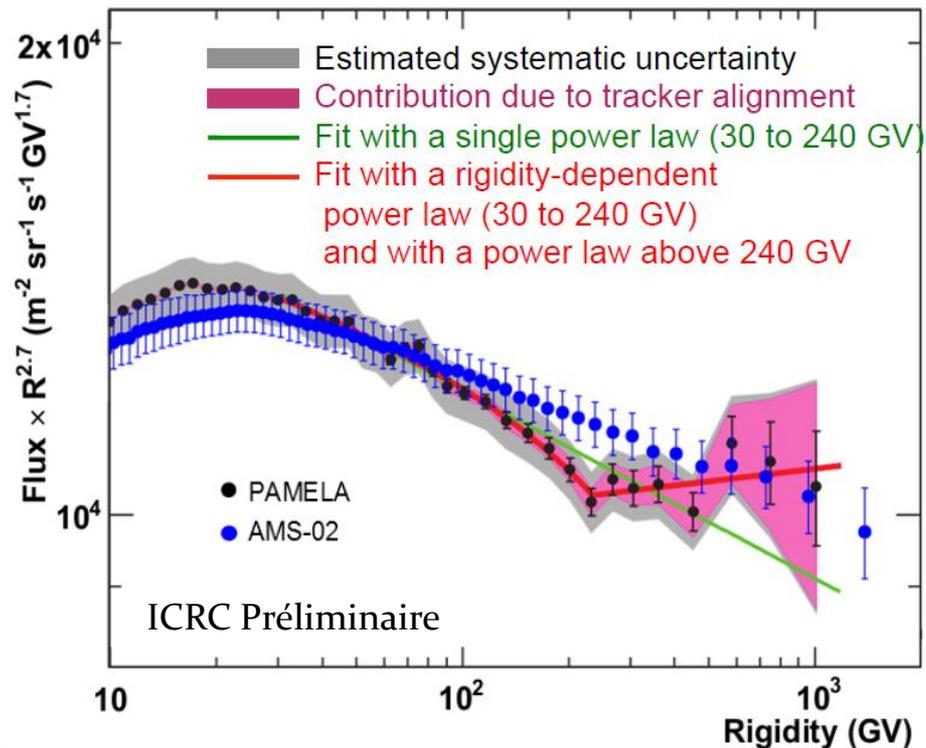
FLUX DE PROTONS

- Composante **dominante** du rayonnement cosmique
 - Pas de **contamination**
 - Non limité par la **statistique**
 - Mesure de grande **précision**



FLUX DE PROTONS

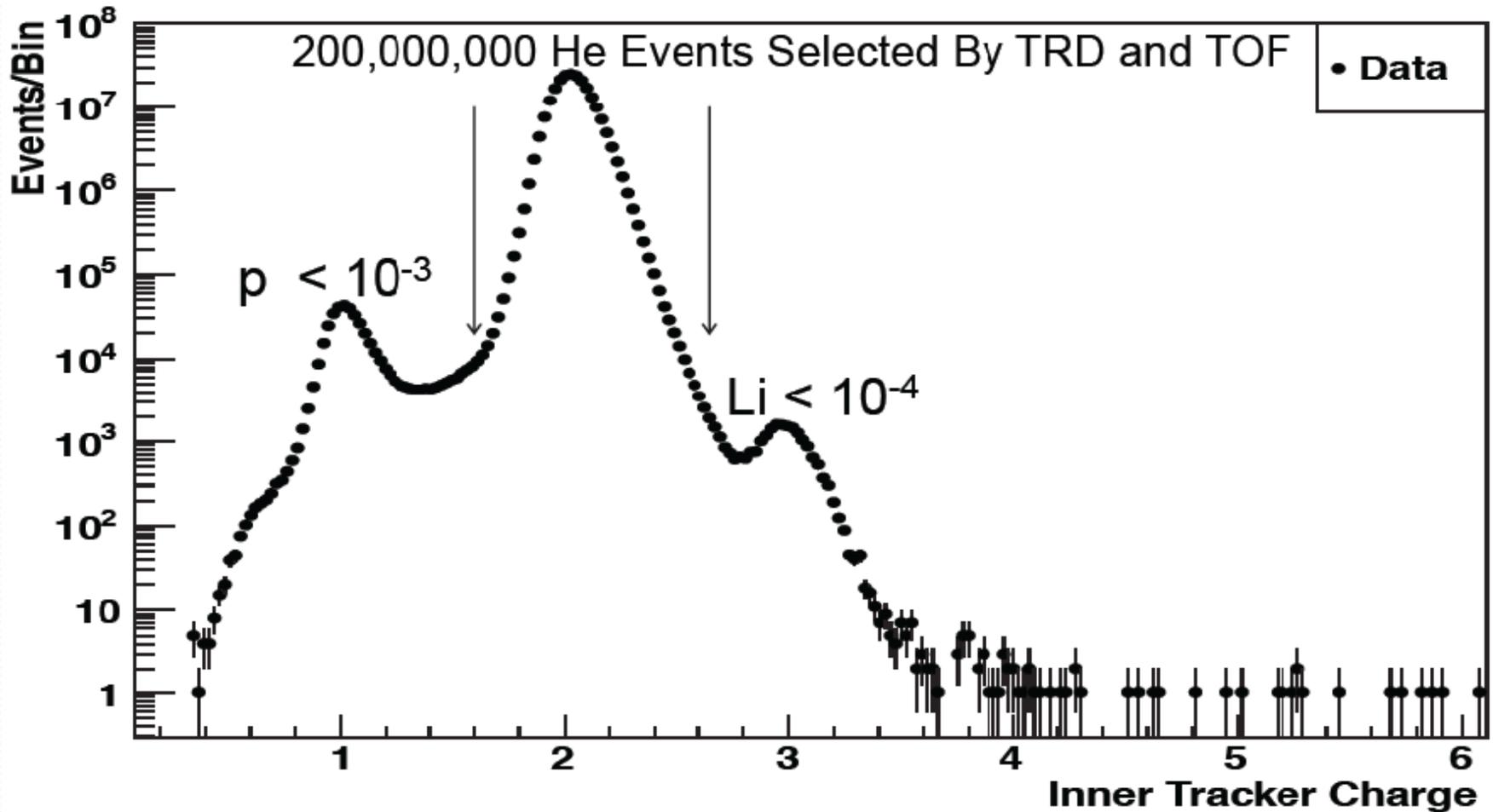
- Comparaison avec l'expérience PAMELA



- Structure vue par PAMELA non confirmée

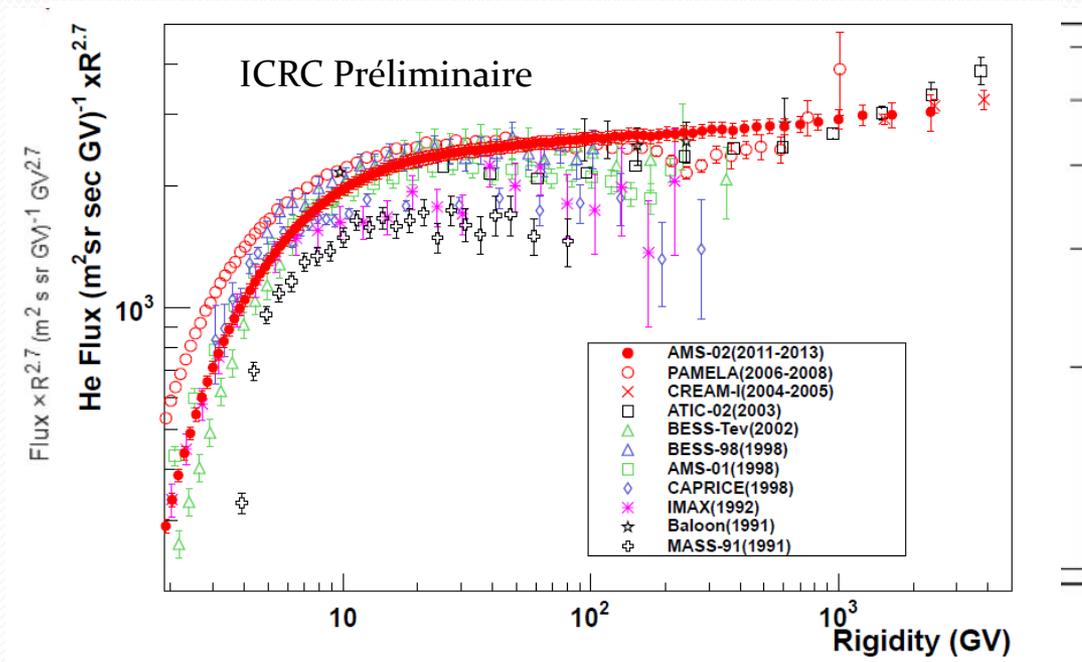
FLUX D'HELIUM

- Sélection des noyaux d'hélium



FLUX D'HELIUM

- Flux d'hélium mesuré jusqu'à 3,2 TV

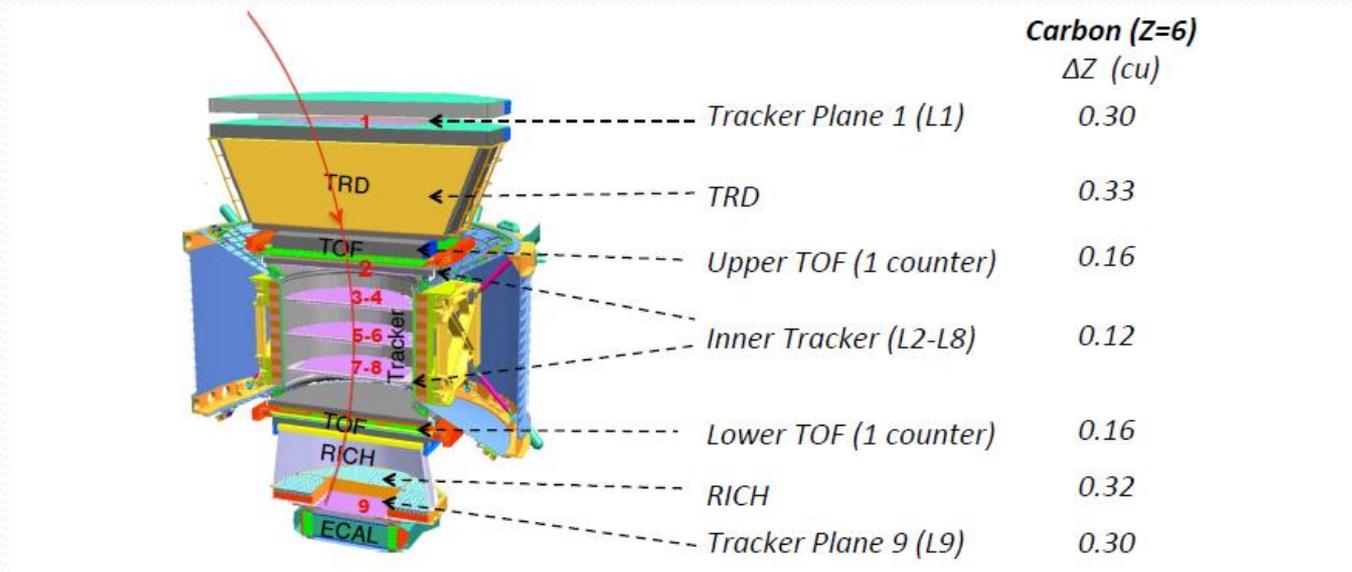


- Flux peut être paramétrisé par une loi de puissance
- Désaccord avec de nombreuses expériences
 - Pas de structure fine vue par AMS, contredisant PAMELA

RAPPORT BORE SUR CARBONE

RAPPORT BORE SUR CARBONE

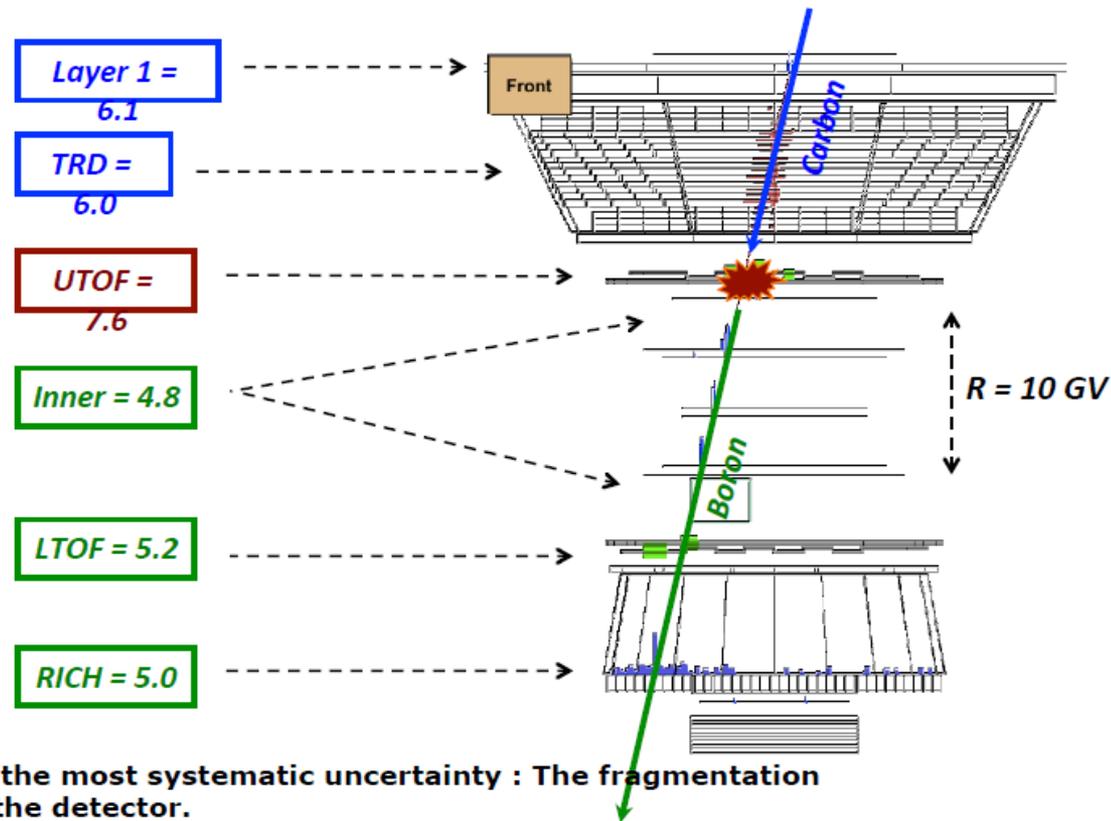
- Permet de sonder la **propagation** des rayons cosmiques dans la Galaxie
 - **Contraint fortement** les modèles de propagation, en particulier δ grâce aux mesures à haute énergie
- Identifier les noyaux avec **$Z=5$ et $Z=6$**
- Mesure **multiple** de la charge



RAPPORT BORE SUR CARBONE

- **Fond principal** : fragmentation (C → B) dans le détecteur

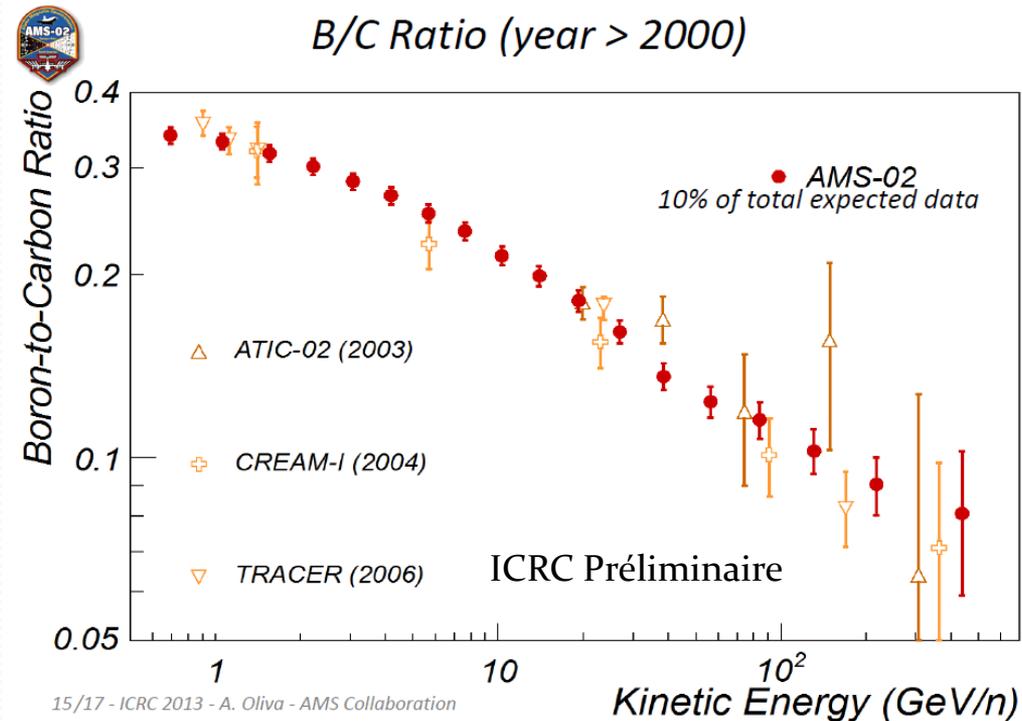
B/C : Identification of Fragmentation Events



One of the most systematic uncertainty : The fragmentation inside the detector.

The first layer do play a key role in the selection

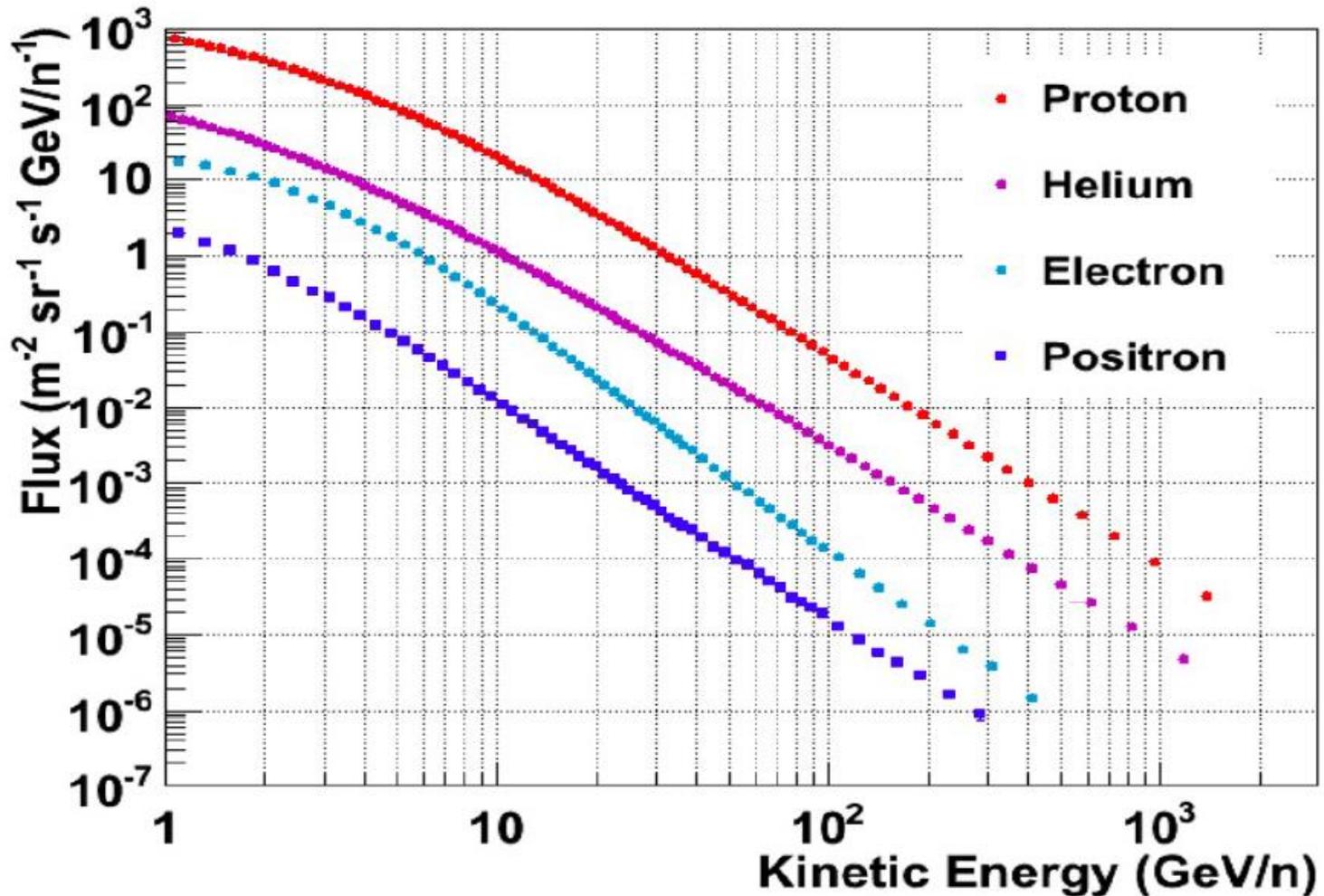
RAPPORT BORE SUR CARBONE



- La limitation de la mesure est **statistique**
 - 10 % de la statistique seulement !
 - But : mesurer à haute énergie avec une **précision de 10 %**

FLUX MESURES PAR AMS

- Comparaison des différents flux mesurés par AMS



AUTRES MESURES A VENIR

- Flux d'antiprotons et rapport antiprotons sur protons
 - Excès d'antiprotons et de positons conjoint serait un signe fort pour la matière noire
- Recherche d'anti-noyaux
 - anti-deutérium, anti-hélium
- Isotopes
 - Par ex. : $\text{Be}^9/\text{Be}^{10}$
- Etude de la modulation solaire
- ...

CONCLUSIONS

- L'expérience AMS **fonctionne** depuis mai 2011 et a enregistré **50 milliards d'événements**
 - Tous les sous-détecteurs sont parfaitement **opérationnels**
- Mesure de la **fraction** et du **flux** de positons
 - Une **source proche** de positons est nécessaire
 - **Matière noire** ou **pulsars** ? Bientôt une réponse ?
- Les flux de **protons** et d'**hélium** contredisent les données précédentes de PAMELA
- Le **rapport B/C** a été mesuré
- AMS prévue pour rester sur l'ISS jusqu'**au moins 2020**
- Les mesures **les plus importantes** sont encore à venir
 - Une **période faste** s'ouvre pour AMS