

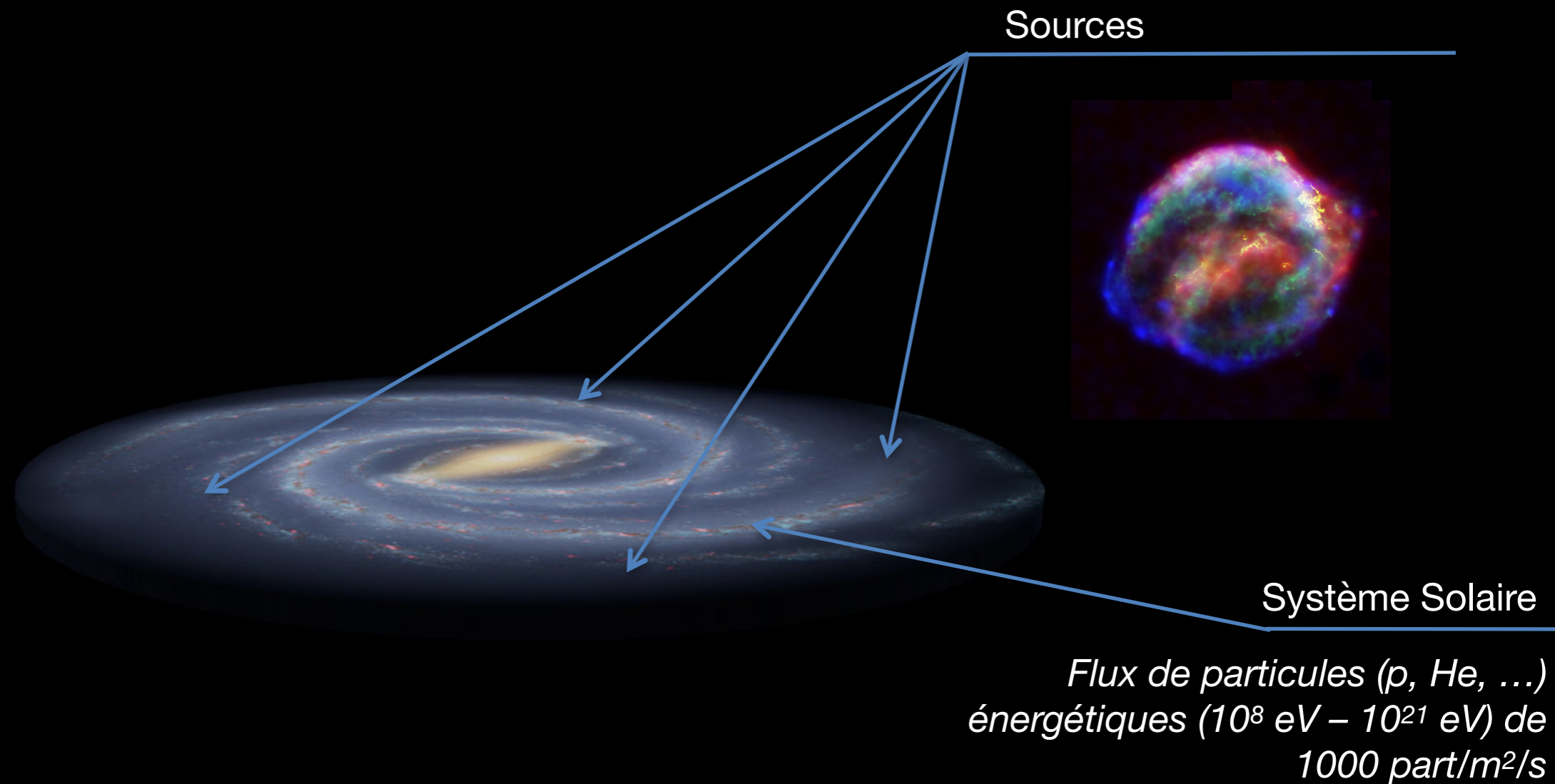


AMS

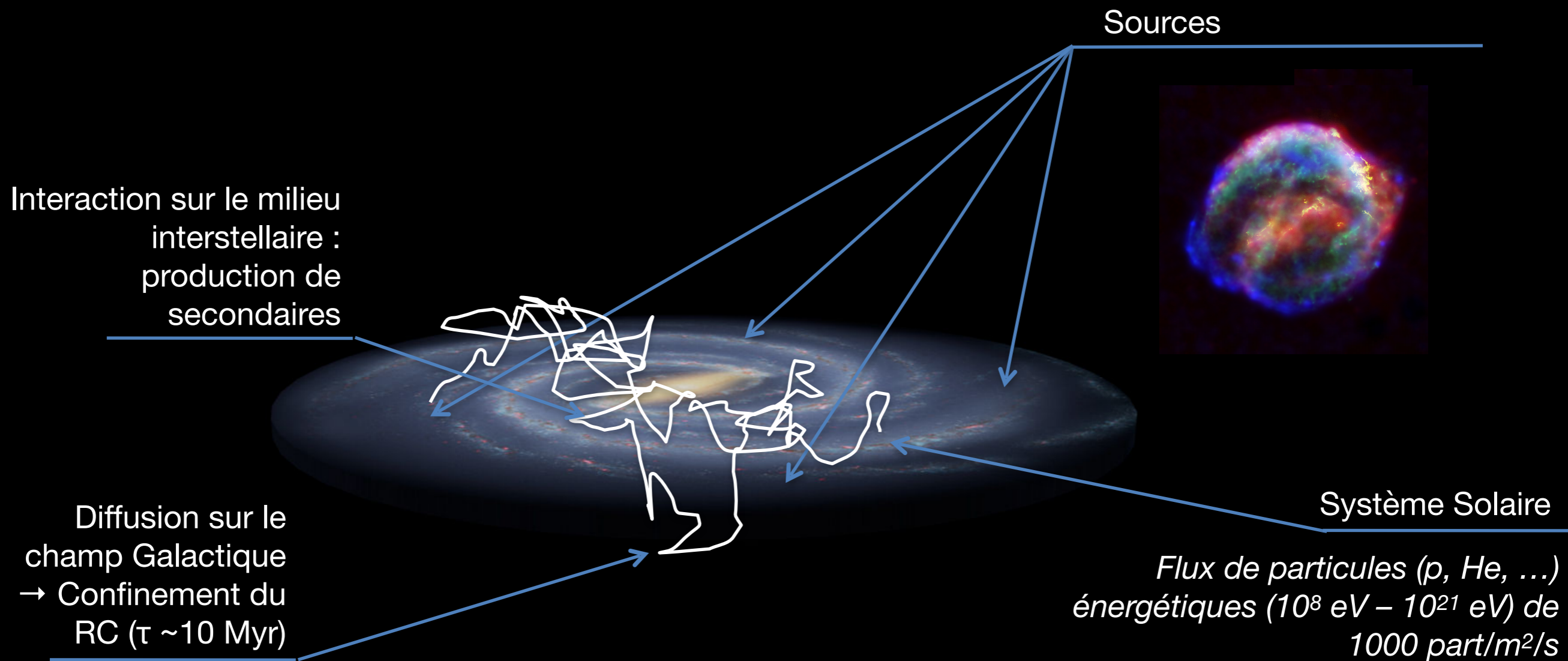
**Conseil Scientifique IN2P3
30 juin 2020**

*Laurent Derome
LPSC/CNRS – Grenoble, France*

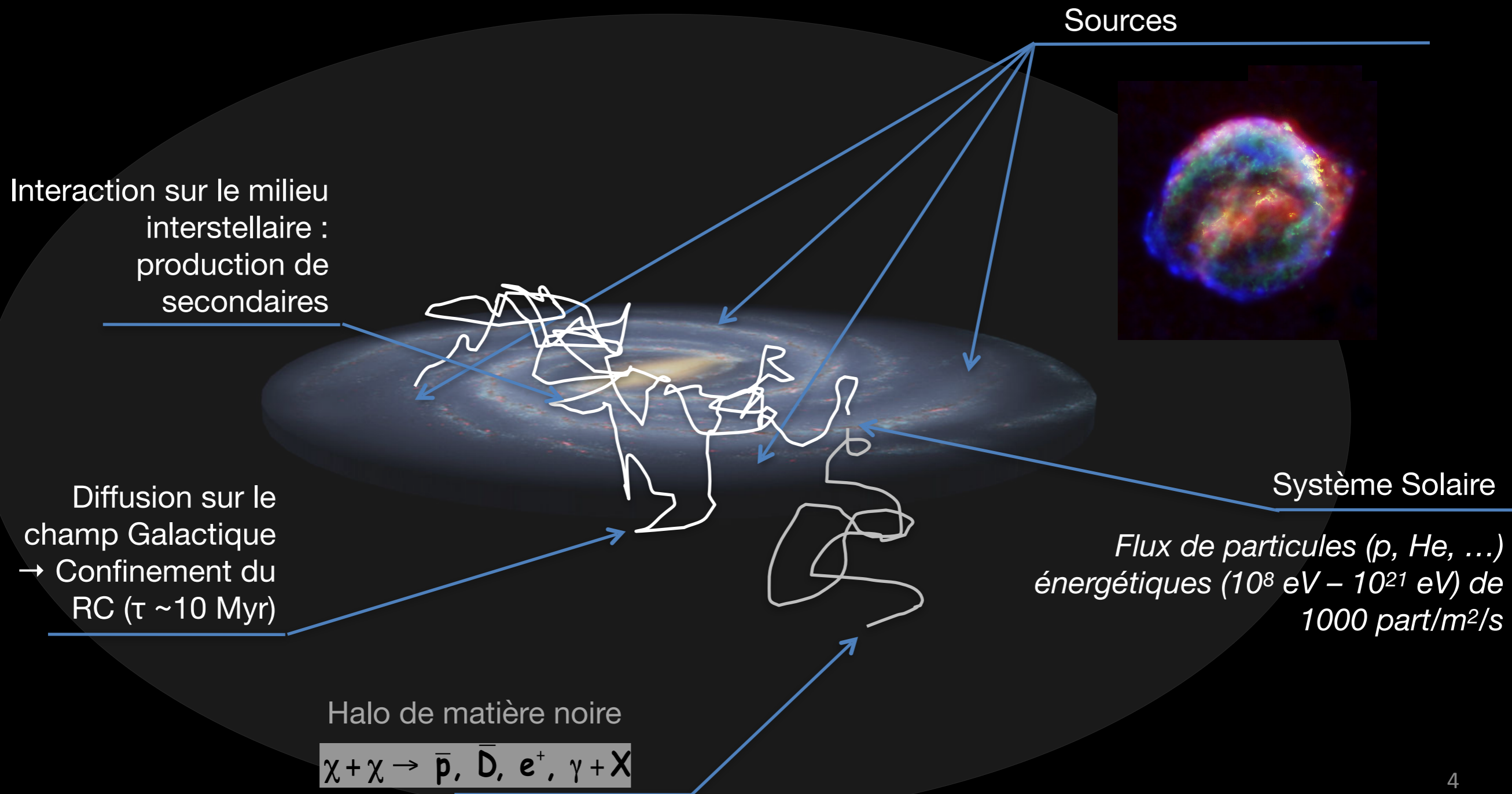
Rayonnement Cosmique Galactique



Rayonnement Cosmique Galactique



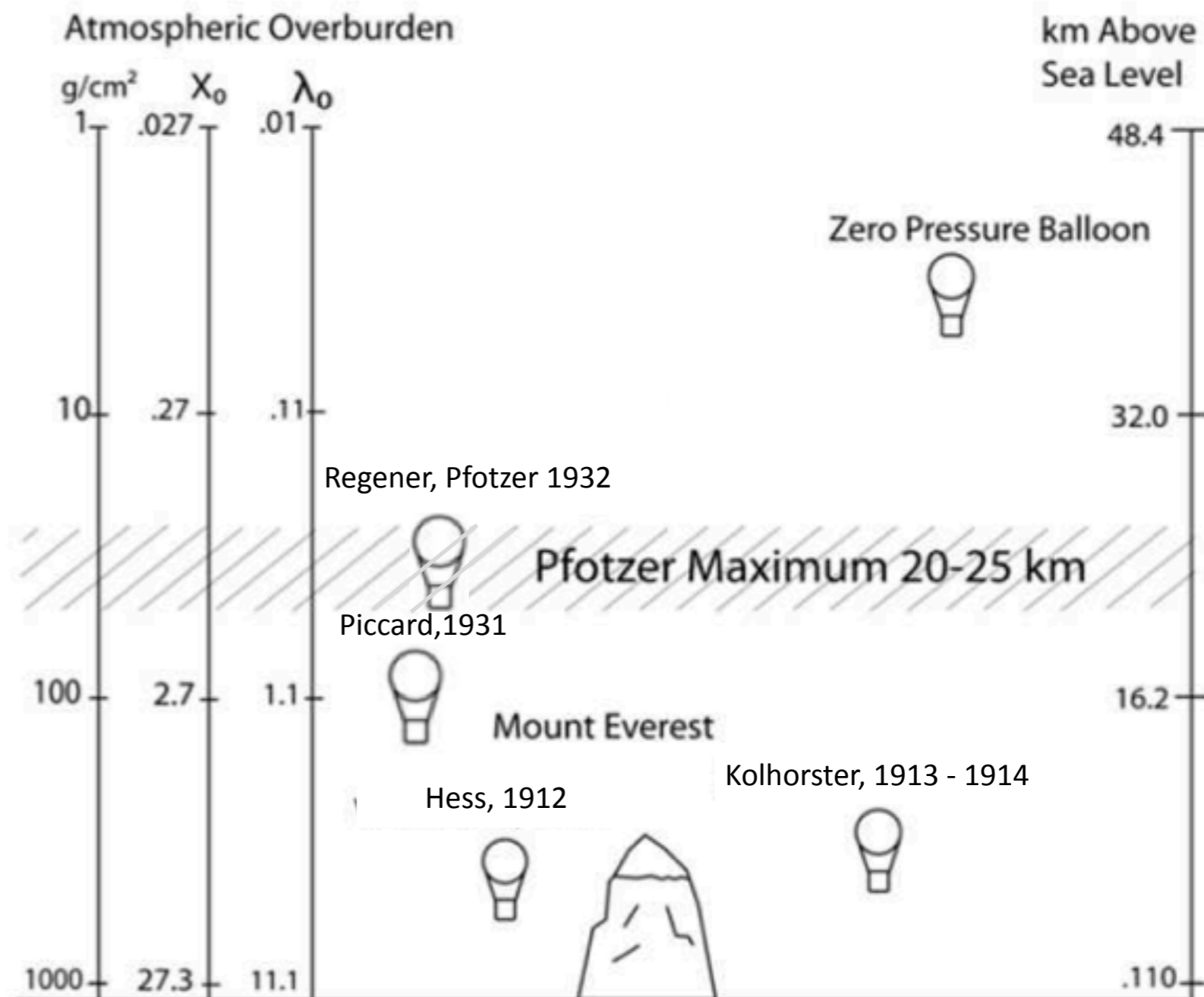
Rayonnement Cosmique Galactique



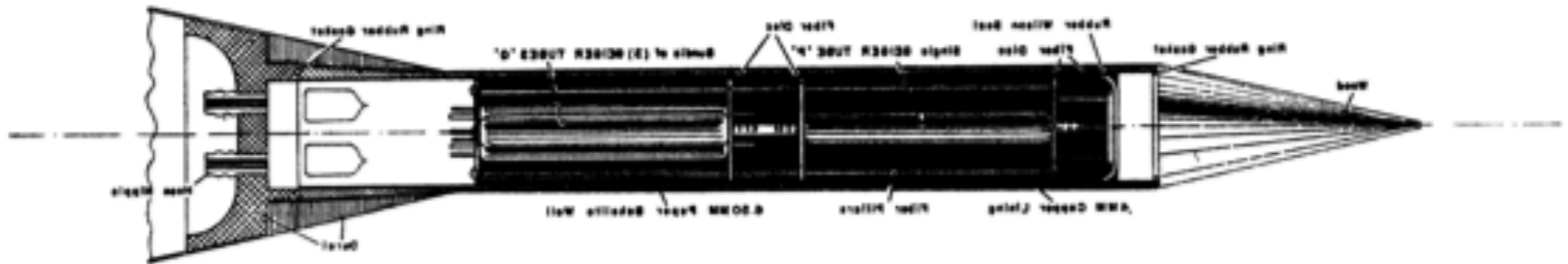
Avant l'ère spatiale, retour sur la découverte du RC

Dans les premières décades après la découverte du RC par HESS (1912), des vols ballons de plus en plus hauts avec des instruments de plus en plus complexes :

- Physique des interactions des particules dans l'atmosphère.
 - Naissance de la physique des particules.
- Jusqu'à la 2nd Guerre mondiale : pas de détection directe du RC.
- La nature des RC déterminée à partir des propriétés des particules secondaires produites dans l'atmosphère (Dépendance avec la latitude, effet est-ouest).



Avant l'ère spatiale, retour sur la découverte du RC



PHYSICAL REVIEW

VOLUME 73, NUMBER 3

FEBRUARY 1, 1948

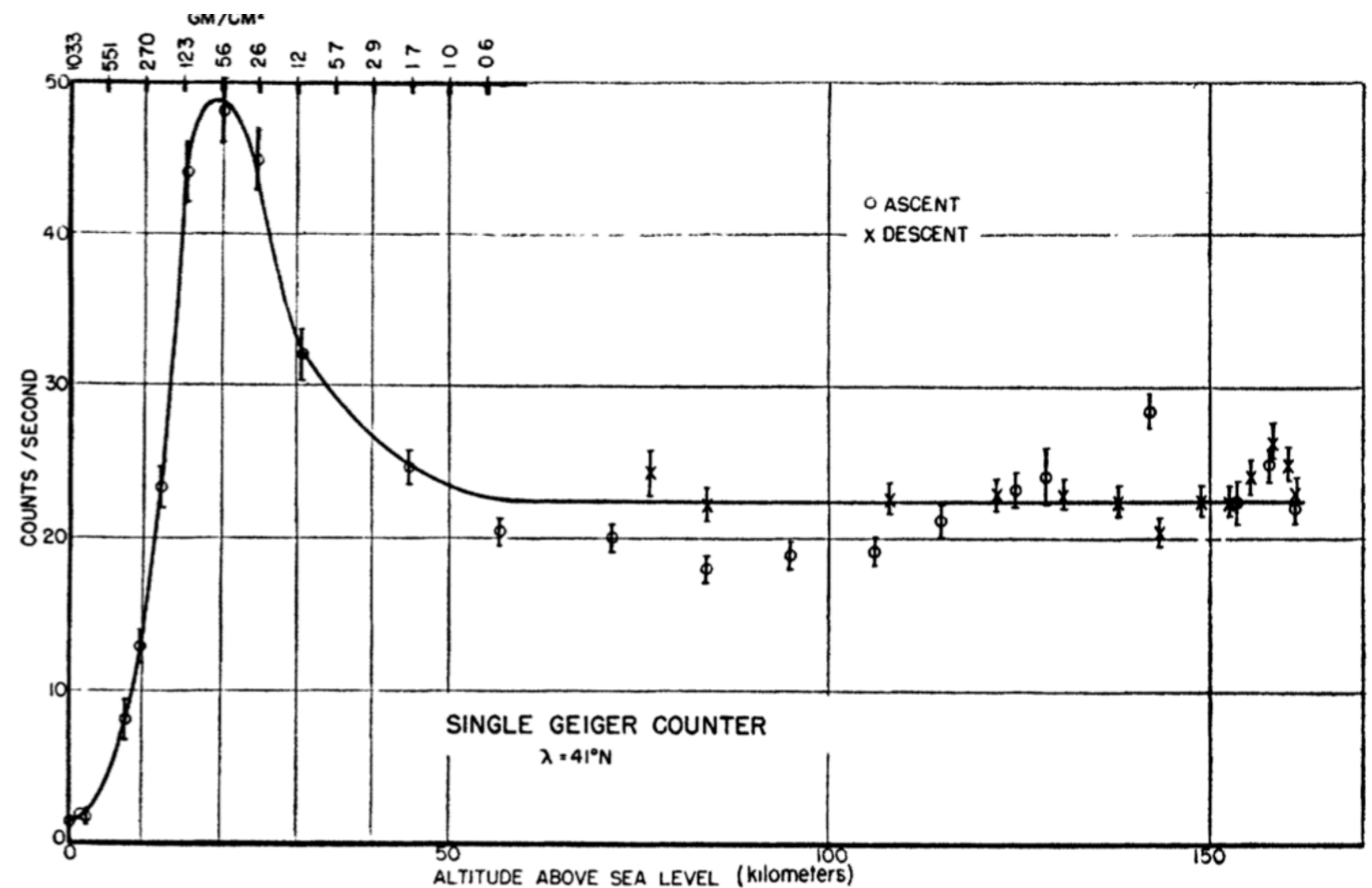
The Cosmic-Ray Counting Rate of a Single Geiger Counter from Ground Level to 161 Kilometers Altitude

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

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

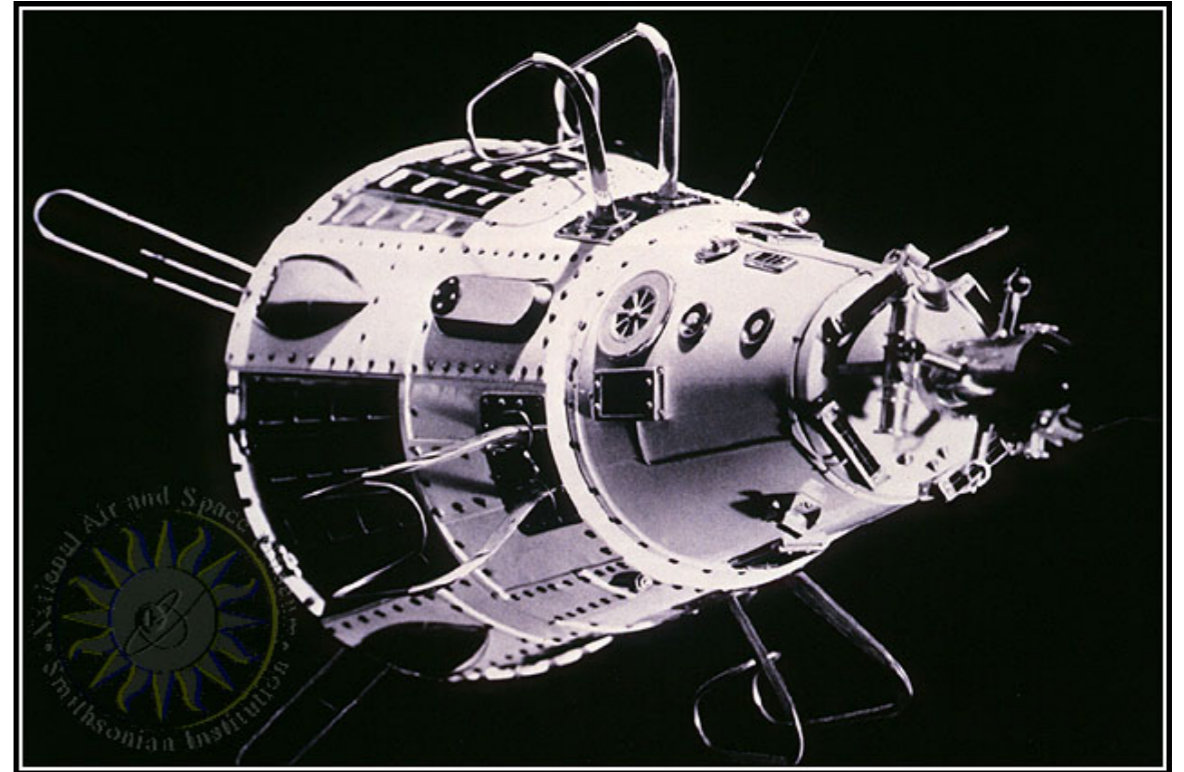
(Received October 16, 1947)

- Juste après la 2nd Guerre mondiale, fusées V-2 récupérées par les US et équipées de compteurs Geiger.
- Plateau au-dessus de 50 km → Première détection directe du RC en dehors de l'atmosphère.

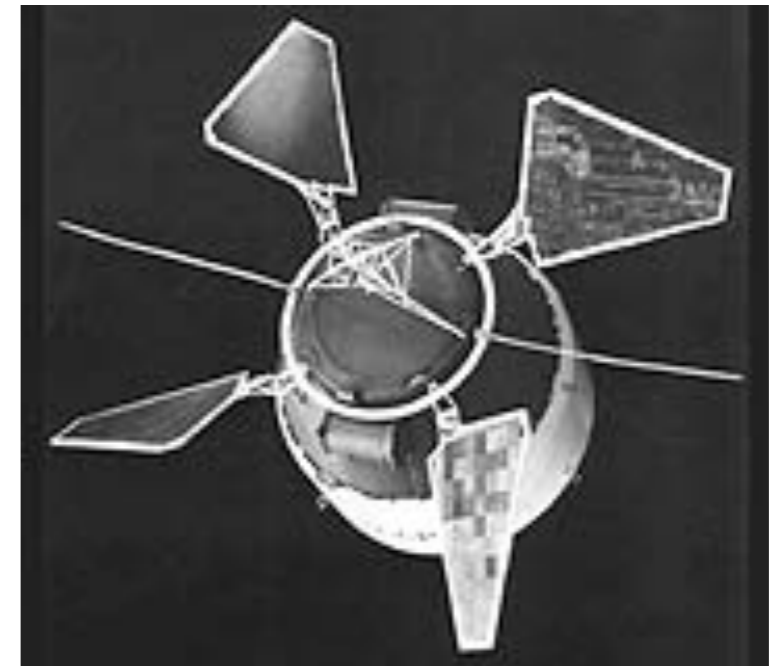


Début de l'ère spatiale

- Physique du RC a accompagné le développement de l'exploration spatiale :
 - Vernov et al (URSS) : première mesure mesure spatiale du RC sur Sputnik II.
 - Van Allen et al. : Découverte des ceintures de Van Allen avec Explorer I (et III).
- A partir des années 60, possibilité d'envoyer des instruments de plus en plus lourds.
- Nombreuses expériences embarquées dans des satellites et en ballon permettent de mesurer le spectre et la composition du rayonnement cosmique jusqu'à la région du genou.



Sputnik II (1957)



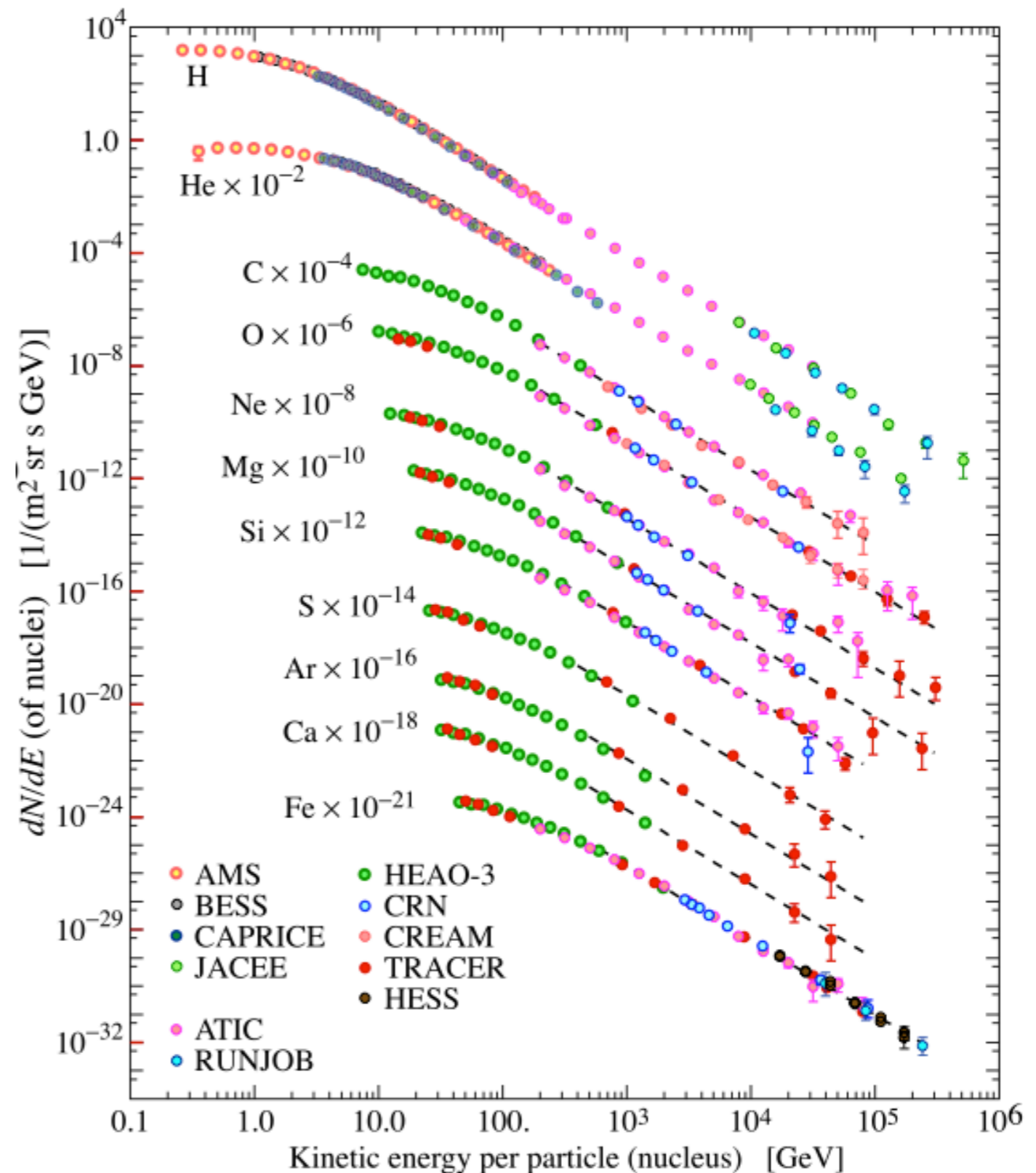
Proton 4 Satellite (1968), 16 tons payload 7

Statut du RC il y a ~10 ans

Propriétés principales :

- Loi de puissance universelle et sans sous structures au-dessus de 2 GeV/n
- Abondances des espèces primaires : proche des abondances dans le système solaire.
- Abondances des espèces secondaires : fragmentation des primaires sur le milieu interstellaire.

→ Ensemble des propriétés bien décrit par un modèle de diffusion avec un spectre d'injection en loi de puissance.

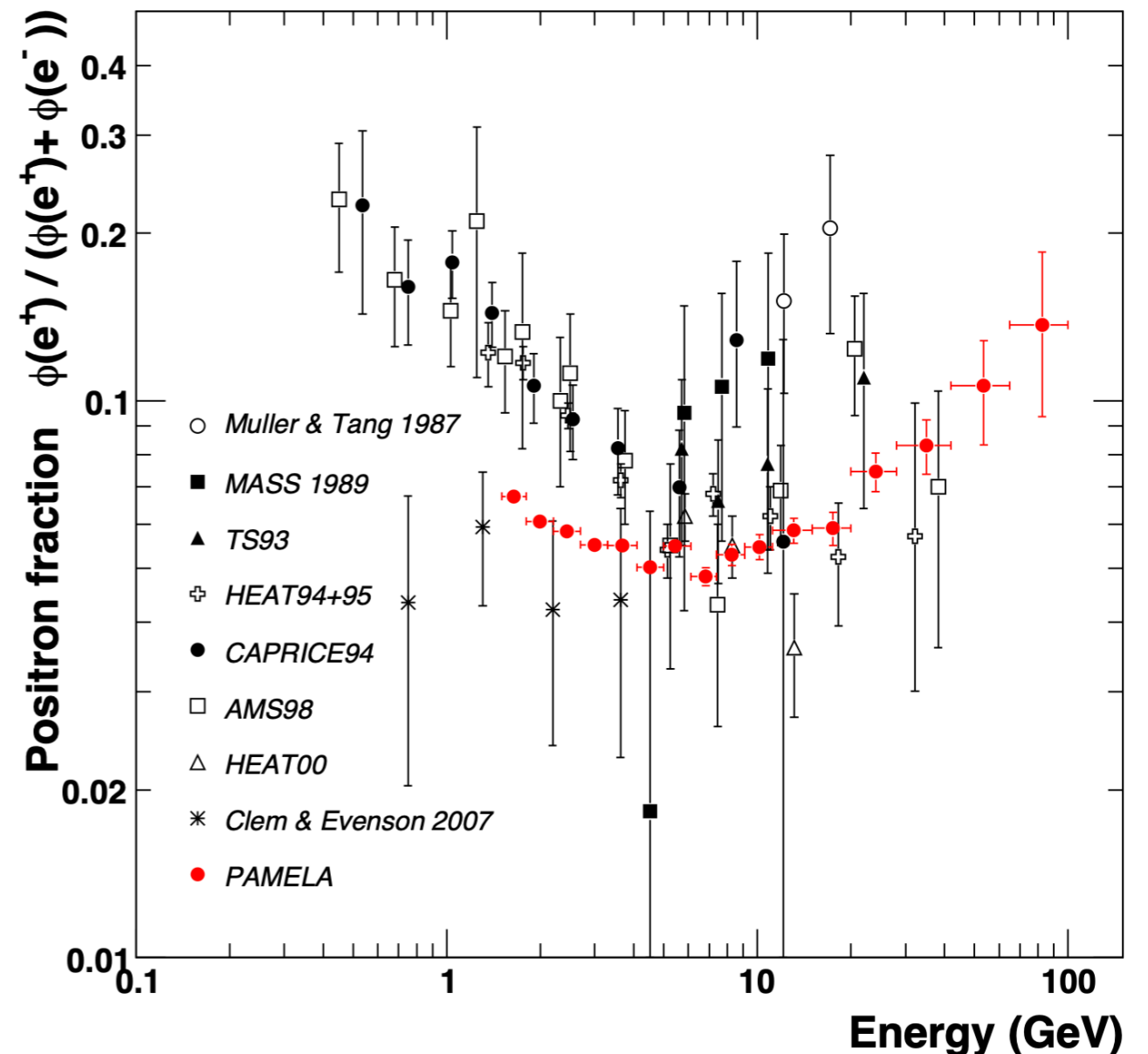


Statut du RC il y a ~10 ans

Propriétés principales :

- Loi de puissance universelle et sans sous structures au-dessus de 2 GeV/n
- Abondances des espèces primaires : proche des abondances dans le système solaire.
- Abondances des espèces secondaires : fragmentation des primaires sur le milieu interstellaire.

→ Composantes rares du RC et recherche de matière noire :
Regain d'intérêt pour le RC dans les années 80-90 : grand nombre d'expériences et nouvelles mesures du RC.



Fraction de positron mesurée par
PAMELA [Nature 458, 607–609(2009)]

Projet AMS



Mesure des composantes du rayonnement cosmique :

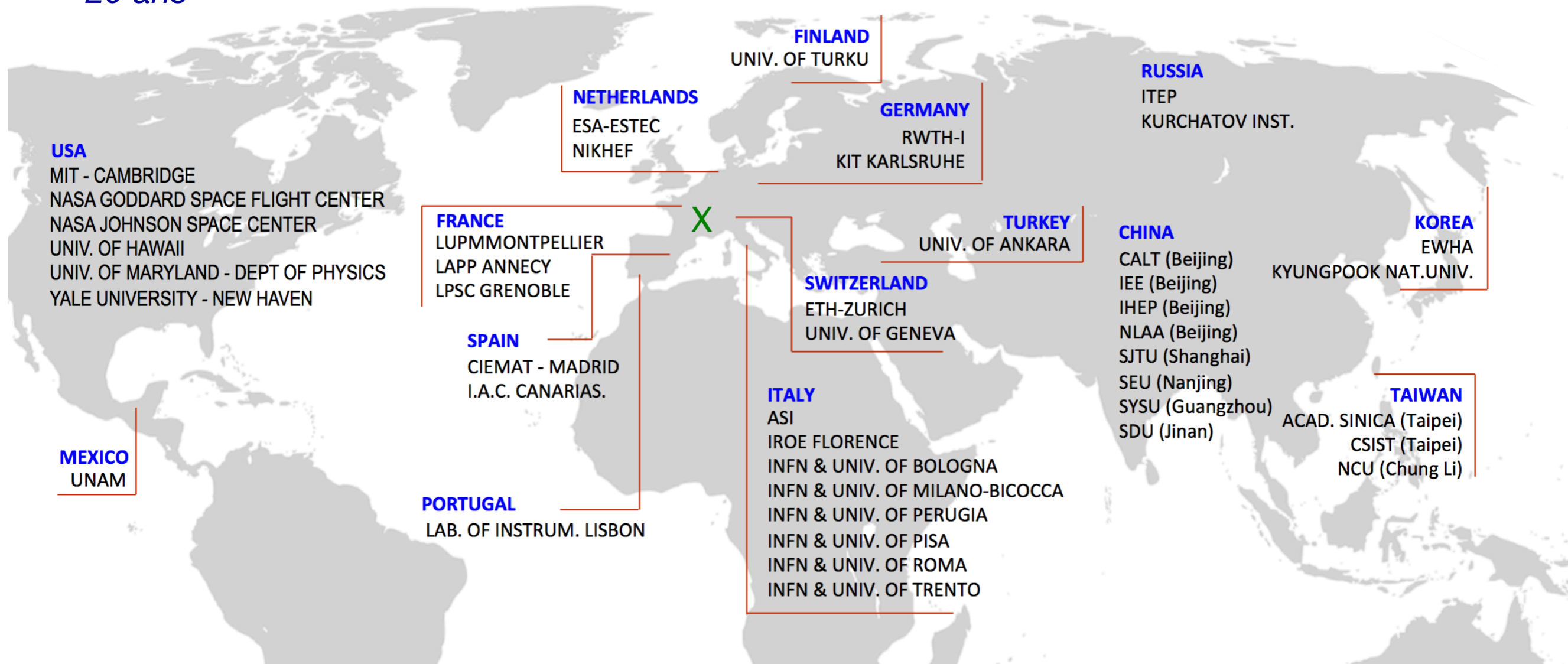
- Origine du RC (Sources, mécanismes d'accélération)
- Propagation dans la Galaxie (Diffusion du RC, interaction avec l'ISM, géométrie de la Galaxie)
- Propagation dans la cavité solaire
- Recherche de signaux de matière noire (e^+ , \bar{p} , \bar{D} , ...)

Un détecteur unique pour répondre à ces questions avec des mesures de haute précision de l'ensemble des composantes du RC jusqu'au TeV.

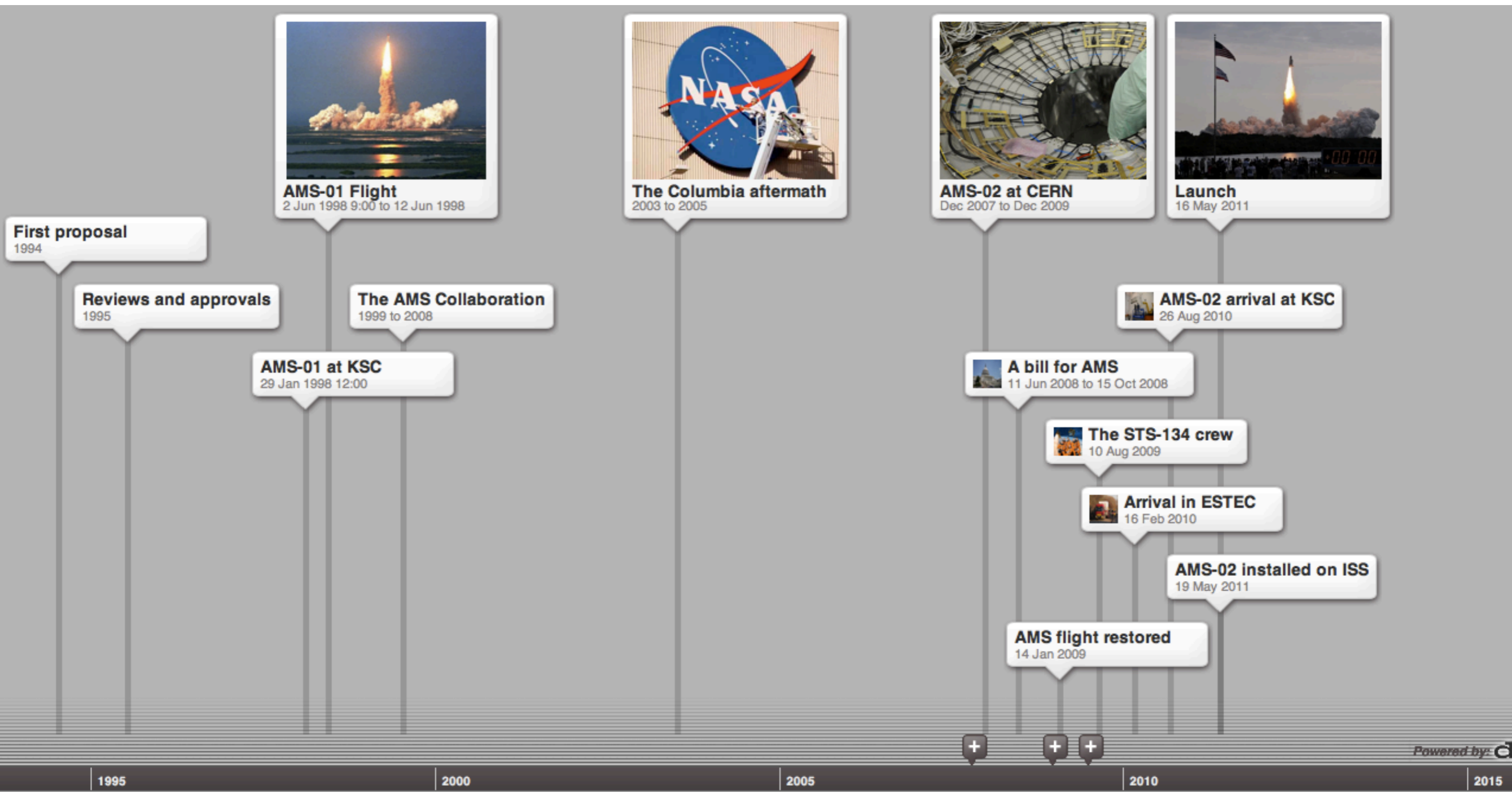
La collaboration AMS



- 16 pays
- 60 laboratoires
- 500+ physiciens
- 20 ans



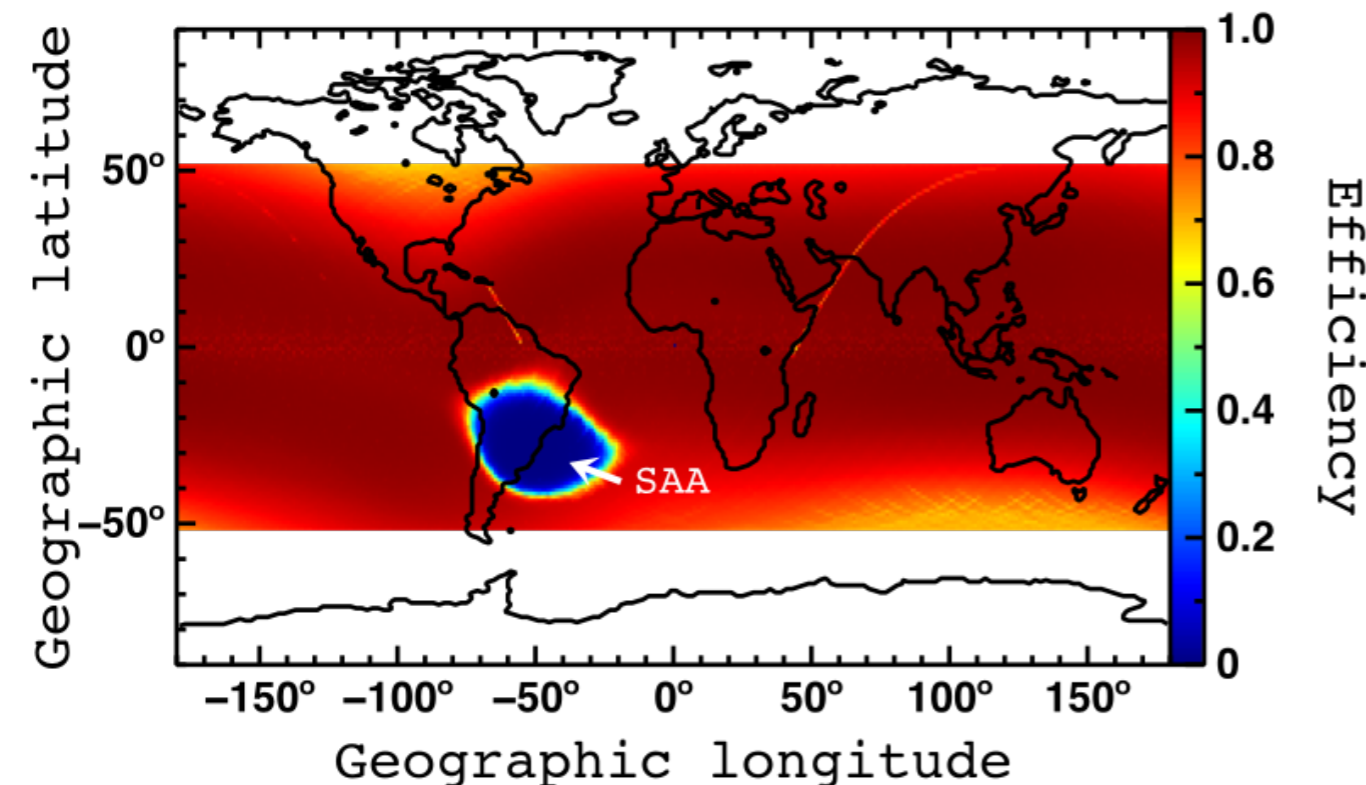
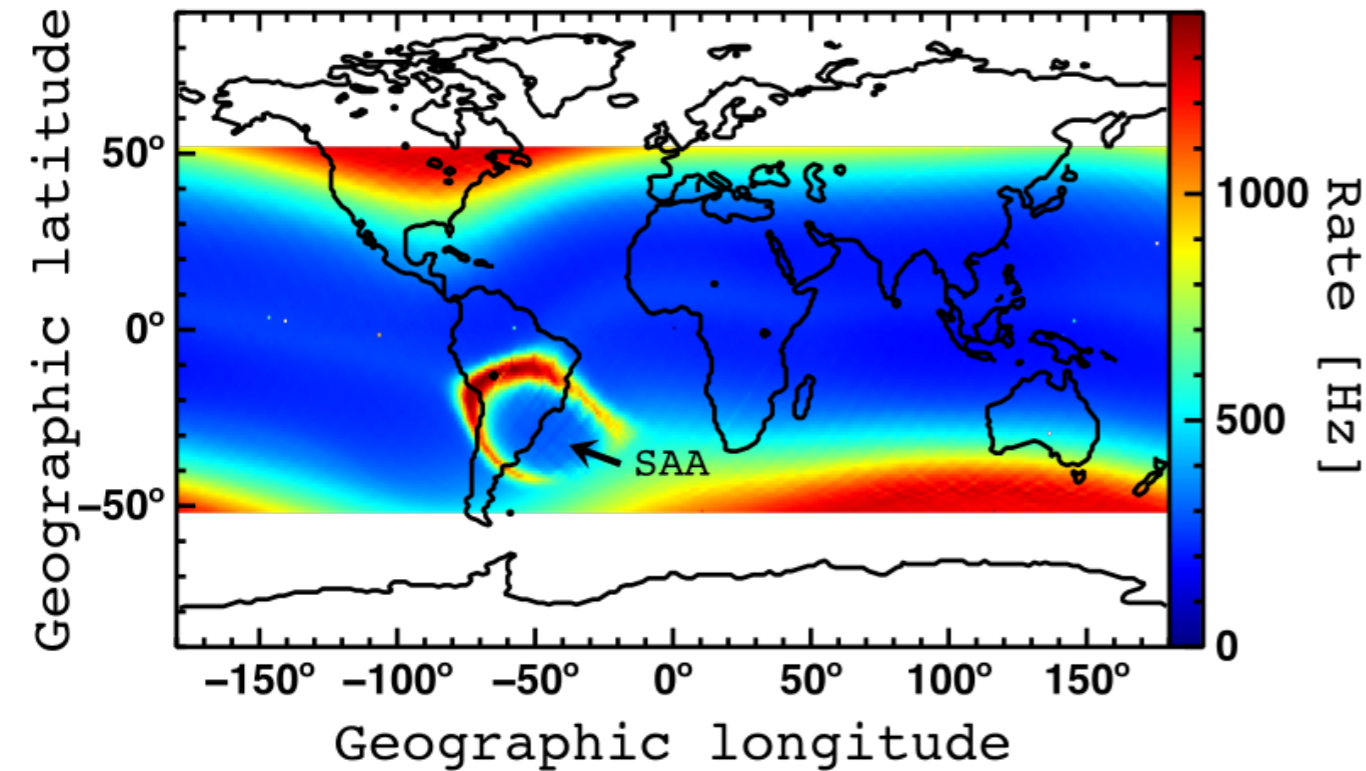
AMS Timeline





Opérations en vol d'AMS-02

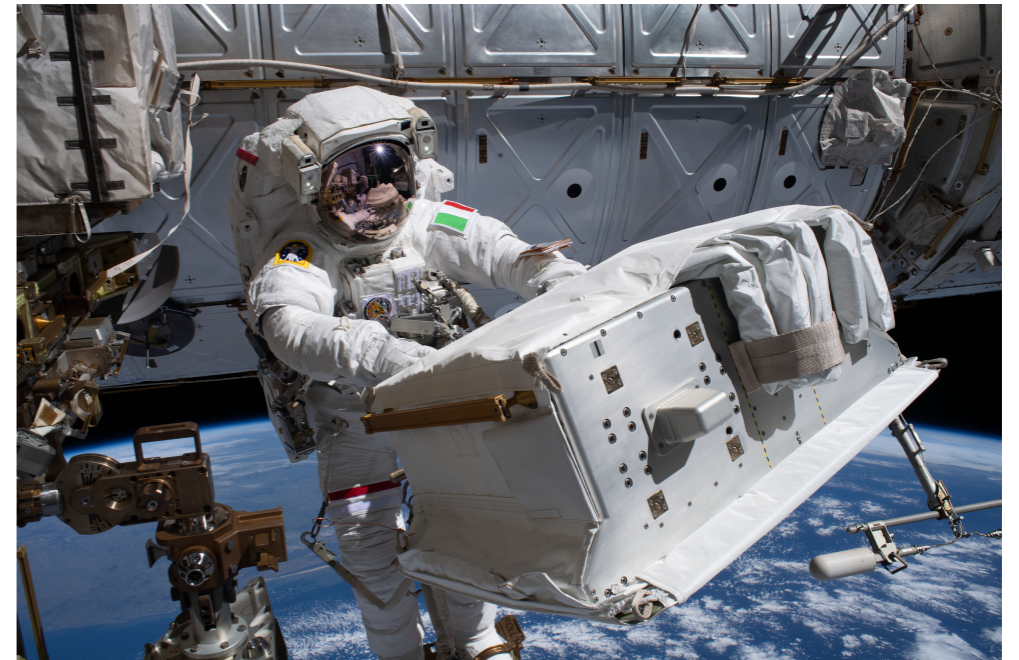
- Contrôle de l'instrument depuis le CERN (AMS POCC, Prévessin)



- Orbite circulaire, 400 km, 51.6°, 90 min
- Opération continue 24/7
- Taux moyen ~700 Hz
- 60 millions particules/jour
- 39 TB raw data/an
- 200 TB rec. data/an
- Plus de 160 milliards d'événements collectés depuis mai 2011.

Réparation AMS-02 : déc. 2019-jan. 2020

- Ensemble des instruments fonctionnent de manière nominale après 9 ans de prise de données.
- Mais problème critique sur les pompes du circuit de refroidissement du tracker : 3 pompes sur 4 déficientes → mode dégradé pendant les orbites “high β angle” et incertitude sur la durée de vie de l’expérience.
- Nouveau système auxiliaire de pompes développé (NASA/MIT/DLR)
- Intervention sur AMS-02 non anticipée, a nécessité un développement important de nouvelles procédures et d’outils spécifiques (NASA).
- 4 sorties extra-véhiculaires entre décembre 2019 et janvier 2020
- Tracker complètement opérationnel depuis.



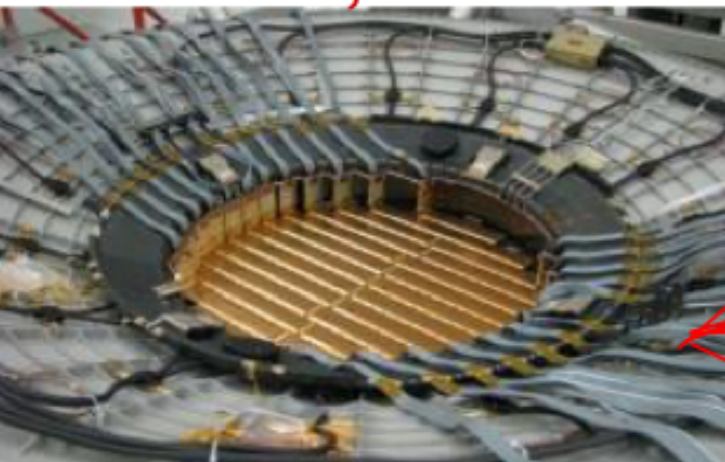
AMS: A TeV precision, multipurpose spectrometer

Particles and nuclei
are defined
by their charge (**Z**)
and energy (**E ~ P**)

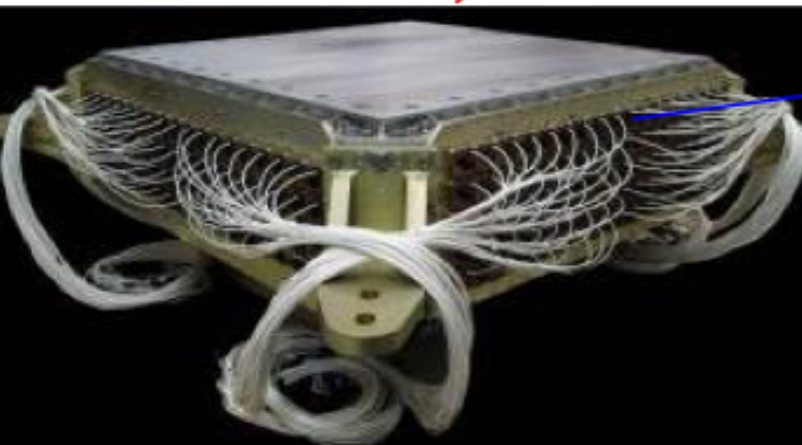
TRD
Identify e^+ , e^-



Silicon Tracker
Z, P



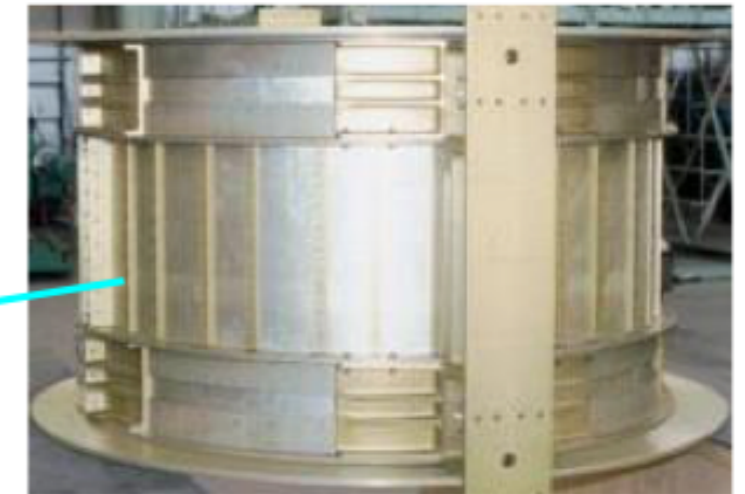
ECAL
E of e^+ , e^-



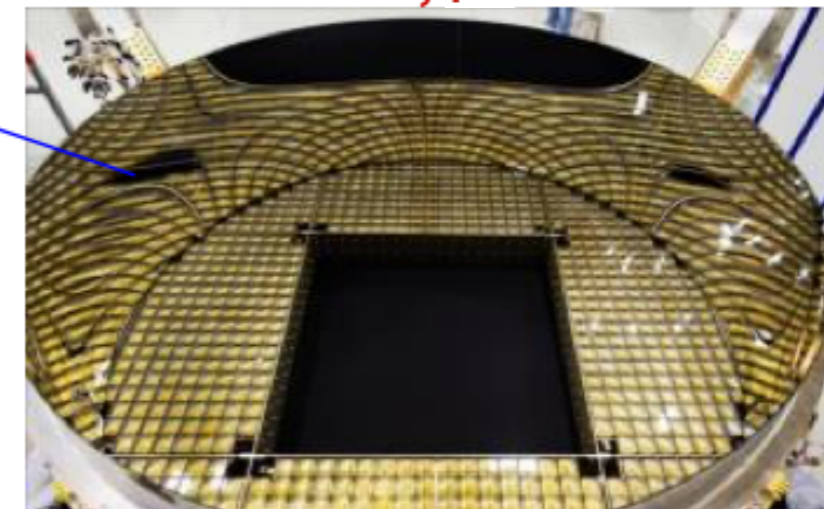
TOF
Z, β



Magnet
 $\pm Z$



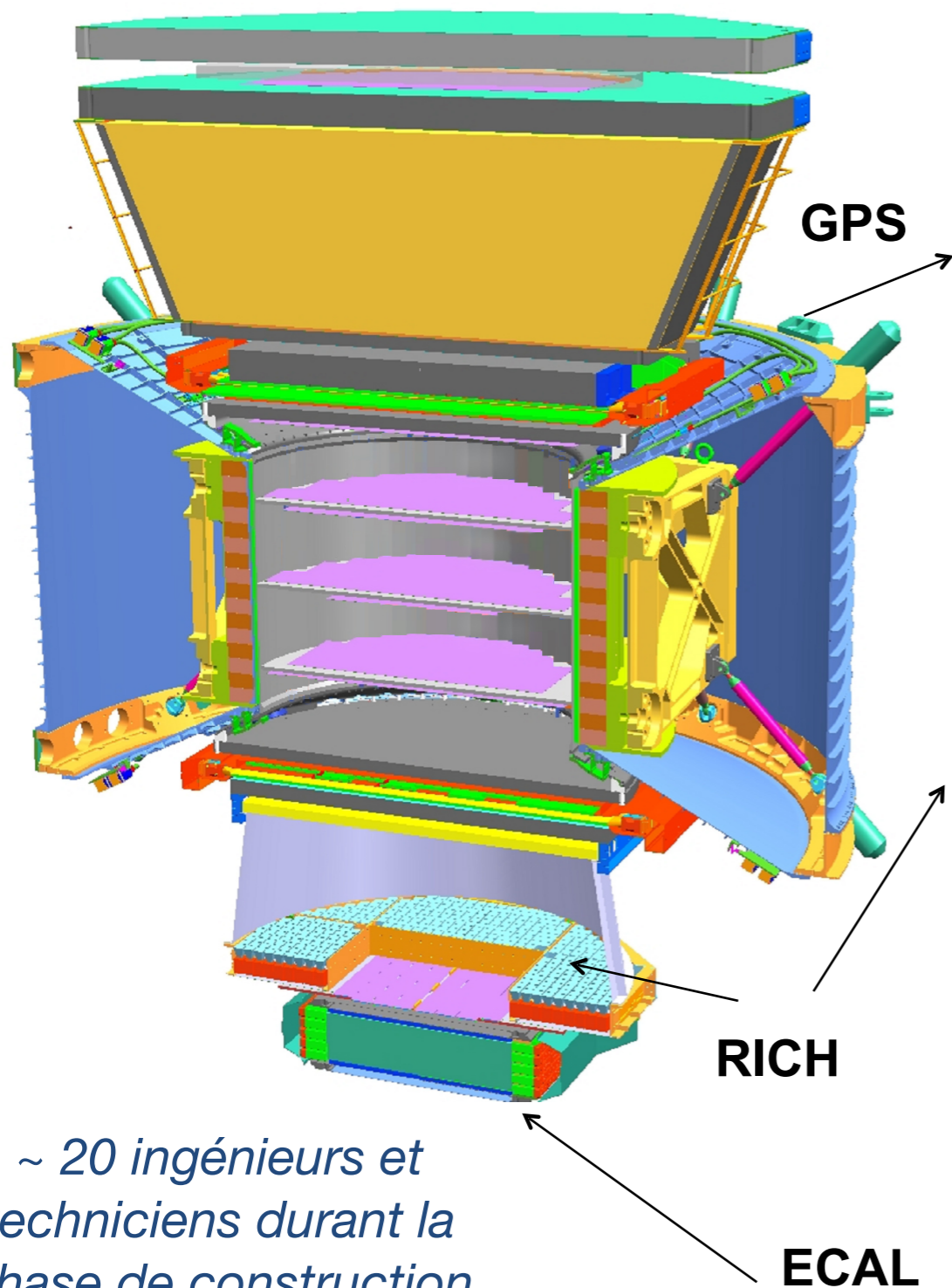
RICH
Z, β



Z and P
are measured independently by the
Tracker, RICH, TOF and ECAL

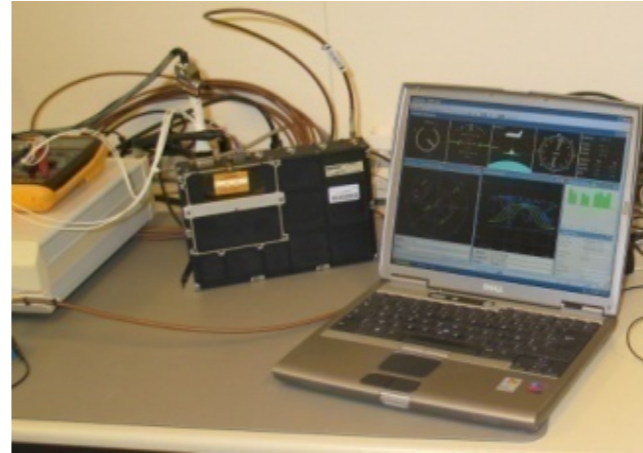
5m x 4m x 3m
7.5 tons

Contribution Française (construction)



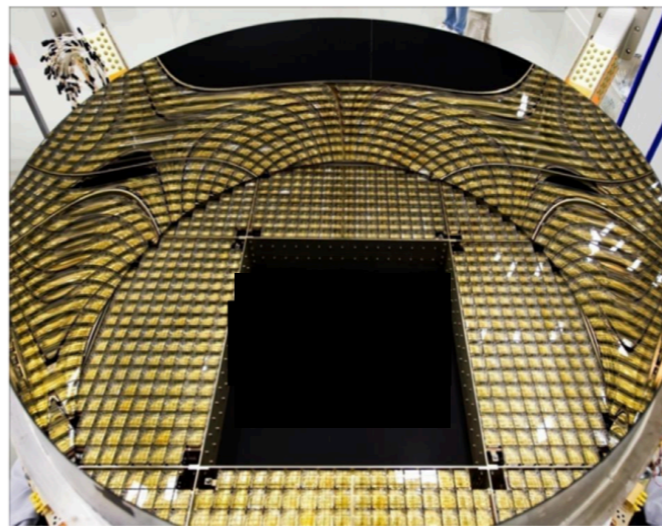
~ 20 ingénieurs et techniciens durant la phase de construction (plus de 10 ans)

LUPM Montpellier



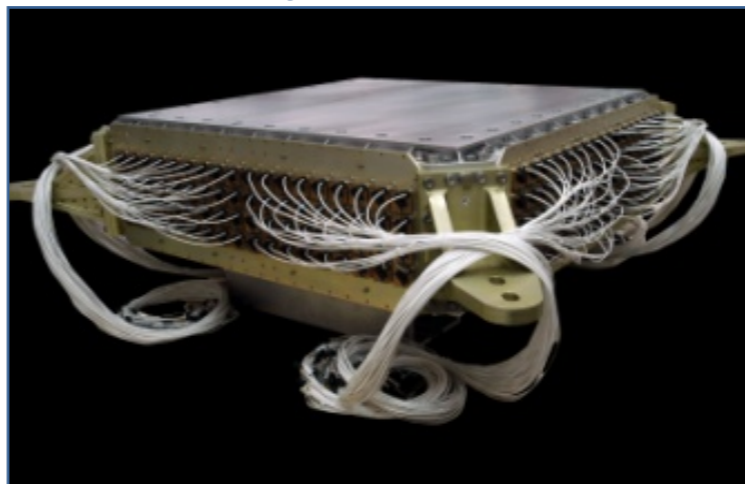
- Système GPS embarqué.

LPSC Grenoble

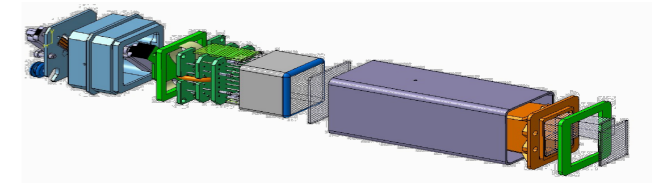


- Electronique Front-end.
- Intégration PMT
- Caractérisation du plan radiateur.

LAPP Annecy



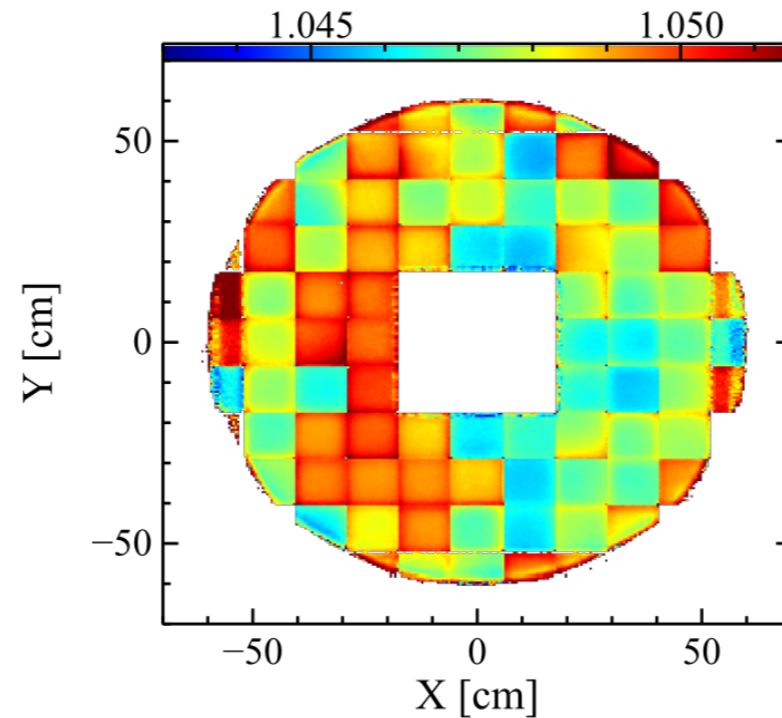
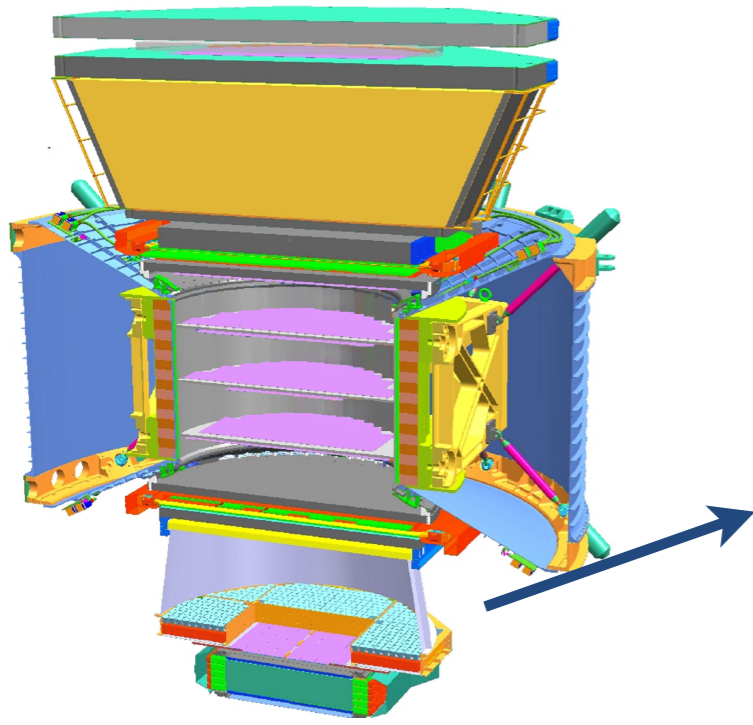
- Système de collection de lumière
- Electronique Front-end



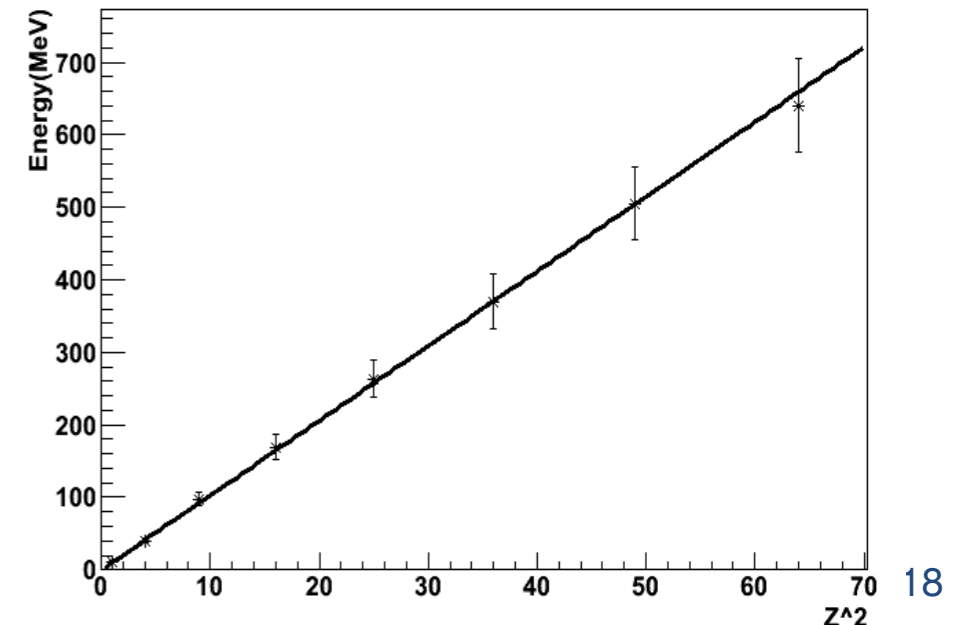
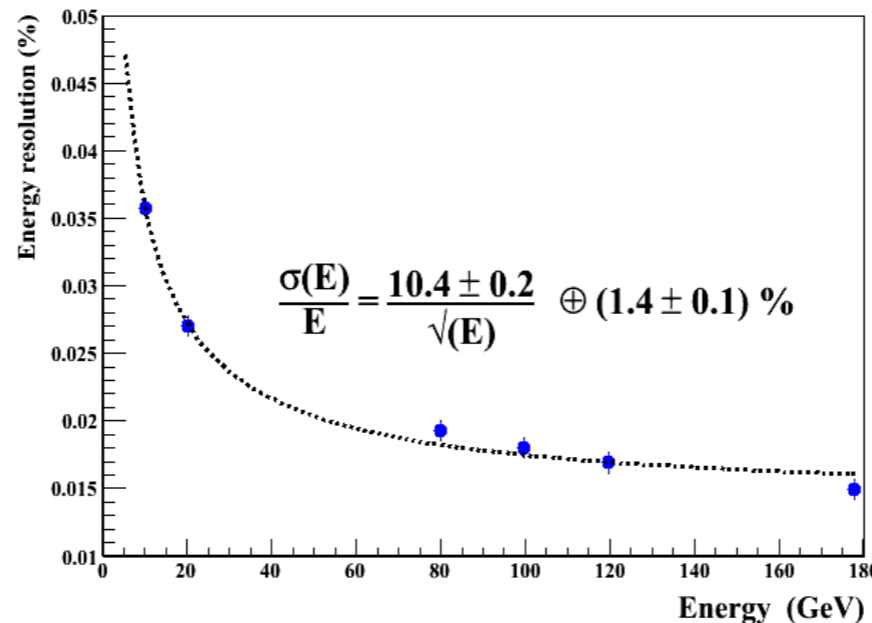
Contribution Française (Performances)

Nombreuses contributions à l'étude et à l'optimisation des performances des détecteurs. Quelques exemples :

- Reconstruction de la carte d'indice des tuiles du radiateur AGL à partir des données de vol :



- Calibration et performances ECAL à l'aide données TB et ISS :



Contribution Française (Analyses)

- Mesure des **antiprotons** : Flux et rapport \bar{p}/p . Développement d'estimateur de confusion de charge.
 - Mesure des **positrons/électrons** : extension de la mesure à haute énergie. Méthode de patron à 3D (ECAL, Tracker, TRD)
 - Mesure des noyaux dans le RC **p, He, Li, Be, B, C, N, O** : Flux et rapports.
 - Isotopes dans le RC : **$^6\text{Li}/^7\text{Li}$, $^7\text{Be}/^9\text{Be}/^{10}\text{Be}$** (en cours)
 - Dépendance en temps : physique de la modulation solaire.
- + Développement d'outils communs pour l'analyse, (méthodes d'unfolding, coupure géomagnétique (data/MC), correction en température du champs magnétique, template fitting, corrections Data/MC...)

Rôle clé du Centre de Calcul : Stockage données, productions MC, analyses

Publications AMS-02 : 17 PRL

Published on: **2020-05-29** [Editors' Suggestion](#) [Featured in Physics](#)

Properties of Neon, Magnesium, and Silicon Primary Cosmic Rays Results from the Alpha Magnetic Spectrometer

[Phys. Rev. Lett. 124, 211102 \(2020\)](#) [†], Citations: **1** [†], [View supplemental material and data](#)

Published on: **2019-11-01** [Editors' Suggestion](#)

Properties of Cosmic Helium Isotopes Measured by the Alpha Magnetic Spectrometer

[Phys. Rev. Lett. 123, 181102 \(2019\)](#) [†], Citations: **5** [†], [View supplemental material and data](#)

Published on: **2019-03-13**

Towards Understanding the Origin of Cosmic-Ray Electrons

[Phys. Rev. Lett. 122, 101101 \(2019\)](#) [†], Citations: **28** [†], [View supplemental material and data](#)

Published on: **2019-01-29** [Editors' Suggestion](#)

Towards Understanding the Origin of Cosmic-Ray Positrons

[Phys. Rev. Lett. 122, 041102 \(2019\)](#) [†], Citations: **61** [†], [View supplemental material and data](#)

Published on: **2018-07-31**

Precision Measurement of Cosmic-Ray Nitrogen and its Primary and Secondary Components with the Alpha Magnetic Spectrometer on the International Space Station

[Phys. Rev. Lett. 121, 051103 \(2018\)](#) [†], Citations: **32** [†], [View supplemental material and data](#)

Published on: **2018-07-31** [Editors' Suggestion](#)

Observation of Complex Time Structures in the Cosmic-Ray Electron and Positron Fluxes with the Alpha Magnetic Spectrometer on the International Space Station

[Phys. Rev. Lett. 121, 051102 \(2018\)](#) [†], Citations: **36** [†], [View supplemental material and data](#)

Published on: **2018-07-31**

Observation of Fine Time Structures in the Cosmic Proton and Helium Fluxes with the Alpha Magnetic Spectrometer on the International Space Station

[Phys. Rev. Lett. 121, 051101 \(2018\)](#) [†], Citations: **40** [†], [View supplemental material and data](#)

Published on: **2018-01-11** [Editors' Suggestion](#) [Featured in Physics](#)

Observation of New Properties of Secondary Cosmic Rays Lithium, Beryllium, and Boron by the Alpha Magnetic Spectrometer on the International Space Station

[Phys. Rev. Lett. 120, 021101 \(2018\)](#) [†], Citations: **87** [†], [View supplemental material and data](#)

Published on: **2017-12-18**

Observation of the Identical Rigidity Dependence of He, C, and O Cosmic Rays at High Rigidities by the Alpha Magnetic Spectrometer on the International Space Station

[Phys. Rev. Lett. 119, 251101 \(2017\)](#) [†], Citations: **93** [†], [View supplemental material and data](#)

Published on: **2016-11-28** [Editors' Suggestion](#) [Featured in Physics](#)

Precision Measurement of the Boron to Carbon Flux Ratio in Cosmic Rays from 1.9 GV to 2.6 TV with the Alpha Magnetic Spectrometer on the International Space Station

[Phys. Rev. Lett. 117, 231102 \(2016\)](#) [†], Citations: **195** [†], [View supplemental material and data](#)

Published on: **2016-08-26**

Antiproton Flux, Antiproton-to-Proton Flux Ratio, and Properties of Elementary Particle Fluxes in Primary Cosmic Rays Measured with the Alpha Magnetic Spectrometer on the International Space Station

[Phys. Rev. Lett. 117, 091103 \(2016\)](#) [†], Citations: **316** [†], [View supplemental material and data](#)

Published on: **2015-11-17** [Editors' Suggestion](#)

Precision Measurement of the Helium Flux in Primary Cosmic Rays of Rigidities 1.9 GV to 3 TV with the Alpha Magnetic Spectrometer on the International Space Station

[Phys. Rev. Lett. 115, 211101 \(2015\)](#) [†], Citations: **304** [†], [View supplemental material and data](#)

Published on: **2015-04-30** [Editors' Suggestion](#)

Precision Measurement of the Proton Flux in Primary Cosmic Rays from Rigidity 1 GV to 1.8 TV with the Alpha Magnetic Spectrometer on the International Space Station

[Phys. Rev. Lett. 114, 171103 \(2015\)](#) [†], Citations: **537** [†], [View supplemental material and data](#)

Published on: **2014-11-26**

Precision Measurement of the ($e^+ + e^-$) Flux in Primary Cosmic Rays from 0.5 GeV to 1 TeV with the Alpha Magnetic Spectrometer on the International Space Station

[Phys. Rev. Lett. 113, 221102 \(2014\)](#) [†], Citations: **264** [†], [View supplemental material and data](#)

Published on: **2014-09-18** [Editors' Suggestion](#) [Featured in Physics](#)

Electron and Positron Fluxes in Primary Cosmic Rays Measured with the Alpha Magnetic Spectrometer on the International Space Station

[Phys. Rev. Lett. 113, 121102 \(2014\)](#) [†], Citations: **473** [†], [View supplemental material and data](#)

Published on: **2014-09-18** [Editors' Suggestion](#)

High Statistics Measurement of the Positron Fraction in Primary Cosmic Rays of 0.5–500 GeV with the Alpha Magnetic Spectrometer on the International Space Station

[Phys. Rev. Lett. 113, 121101 \(2014\)](#) [†], Citations: **528** [†], [View supplemental material and data](#)

Published on: **2013-04-03** [Editors' Suggestion](#) [Featured in Physics](#) [Physics Viewpoint](#)

First Result from the Alpha Magnetic Spectrometer on the International Space Station: Precision Measurement of the Positron Fraction in Primary Cosmic Rays of 0.5–350 GeV

[Phys. Rev. Lett. 110, 141102 \(2013\)](#) [†], Citations: **1,055** [†], [View supplemental material and data](#)

Publications AMS-02 : Contributions

Published on: **2020-05-29** [Editors' Suggestion](#) [Featured in Physics](#)

Properties of Neon, Magnesium, and Silicon Primary Cosmic Rays Results from the Alpha Magnetic Spectrometer

[Phys. Rev. Lett. 124, 211102 \(2020\)](#) [†], Citations: **1** [†], [View supplemental material and data](#)

Published on: **2019-11-01** [Editors' Suggestion](#) 

Properties of Cosmic Helium Isotopes Measured by the Alpha Magnetic Spectrometer

[Phys. Rev. Lett. 123, 181102 \(2019\)](#) [†], Citations: **5** [†], [View supplemental material and data](#)

Published on: **2019-03-13**

Towards Understanding the Origin of Cosmic-Ray Electrons

[Phys. Rev. Lett. 122, 101101 \(2019\)](#) [†], Citations: **28** [†], [View supplemental material and data](#)

Published on: **2019-01-29** [Editors' Suggestion](#)

Towards Understanding the Origin of Cosmic-Ray Positrons

[Phys. Rev. Lett. 122, 041102 \(2019\)](#) [†], Citations: **61** [†], [View supplemental material and data](#)

Published on: **2018-07-31** 

Precision Measurement of Cosmic-Ray Nitrogen and its Primary and Secondary Components with the Alpha Magnetic Spectrometer on the International Space Station

[Phys. Rev. Lett. 121, 051103 \(2018\)](#) [†], Citations: **32** [†], [View supplemental material and data](#)

Published on: **2018-07-31** [Editors' Suggestion](#)

Observation of Complex Time Structures in the Cosmic-Ray Electron and Positron Fluxes with the Alpha Magnetic Spectrometer on the International Space Station

[Phys. Rev. Lett. 121, 051102 \(2018\)](#) [†], Citations: **36** [†], [View supplemental material and data](#)

Published on: **2018-07-31**

Observation of Fine Time Structures in the Cosmic Proton and Helium Fluxes with the Alpha Magnetic Spectrometer on the International Space Station

[Phys. Rev. Lett. 121, 051101 \(2018\)](#) [†], Citations: **40** [†], [View supplemental material and data](#)

Published on: **2018-01-11** [Editors' Suggestion](#) [Featured in Physics](#) 

Observation of New Properties of Secondary Cosmic Rays Lithium, Beryllium, and Boron by the Alpha Magnetic Spectrometer on the International Space Station

[Phys. Rev. Lett. 120, 021101 \(2018\)](#) [†], Citations: **87** [†], [View supplemental material and data](#)

Published on: **2017-12-18**

Observation of the Identical Rigidity Dependence of He, C, and O Cosmic Rays at High Rigidities by the Alpha Magnetic Spectrometer on the International Space Station

[Phys. Rev. Lett. 119, 251101 \(2017\)](#) [†], Citations: **93** [†], [View supplemental material and data](#)

Published on: **2016-11-28** [Editors' Suggestion](#) [Featured in Physics](#)

Precision Measurement of the Boron to Carbon Flux Ratio in Cosmic Rays from 1.9 GV to 2.6 TV with the Alpha Magnetic Spectrometer on the International Space Station

[Phys. Rev. Lett. 117, 231102 \(2016\)](#) [†], Citations: **195** [†], [View supplemental material and data](#)

Published on: **2016-08-26** 

Antiproton Flux, Antiproton-to-Proton Flux Ratio, and Properties of Elementary Particle Fluxes in Primary Cosmic Rays Measured with the Alpha Magnetic Spectrometer on the International Space Station

[Phys. Rev. Lett. 117, 091103 \(2016\)](#) [†], Citations: **316** [†], [View supplemental material and data](#)

Published on: **2015-11-17** [Editors' Suggestion](#) 

Precision Measurement of the Helium Flux in Primary Cosmic Rays of Rigidities 1.9 GV to 3 TV with the Alpha Magnetic Spectrometer on the International Space Station

[Phys. Rev. Lett. 115, 211101 \(2015\)](#) [†], Citations: **304** [†], [View supplemental material and data](#)

Published on: **2015-04-30** [Editors' Suggestion](#) 

Precision Measurement of the Proton Flux in Primary Cosmic Rays from Rigidity 1 GV to 1.8 TV with the Alpha Magnetic Spectrometer on the International Space Station

[Phys. Rev. Lett. 114, 171103 \(2015\)](#) [†], Citations: **537** [†], [View supplemental material and data](#)

Published on: **2014-11-26**

Precision Measurement of the ($e^+ + e^-$) Flux in Primary Cosmic Rays from 0.5 GeV to 1 TeV with the Alpha Magnetic Spectrometer on the International Space Station

[Phys. Rev. Lett. 113, 221102 \(2014\)](#) [†], Citations: **264** [†], [View supplemental material and data](#)

Published on: **2014-09-18** [Editors' Suggestion](#) [Featured in Physics](#) 

Electron and Positron Fluxes in Primary Cosmic Rays Measured with the Alpha Magnetic Spectrometer on the International Space Station

[Phys. Rev. Lett. 113, 121102 \(2014\)](#) [†], Citations: **473** [†], [View supplemental material and data](#)

Published on: **2014-09-18** [Editors' Suggestion](#) 

High Statistics Measurement of the Positron Fraction in Primary Cosmic Rays of 0.5–500 GeV with the Alpha Magnetic Spectrometer on the International Space Station

[Phys. Rev. Lett. 113, 121101 \(2014\)](#) [†], Citations: **528** [†], [View supplemental material and data](#)

Published on: **2013-04-03** [Editors' Suggestion](#) [Featured in Physics](#) [Physics Viewpoint](#) 

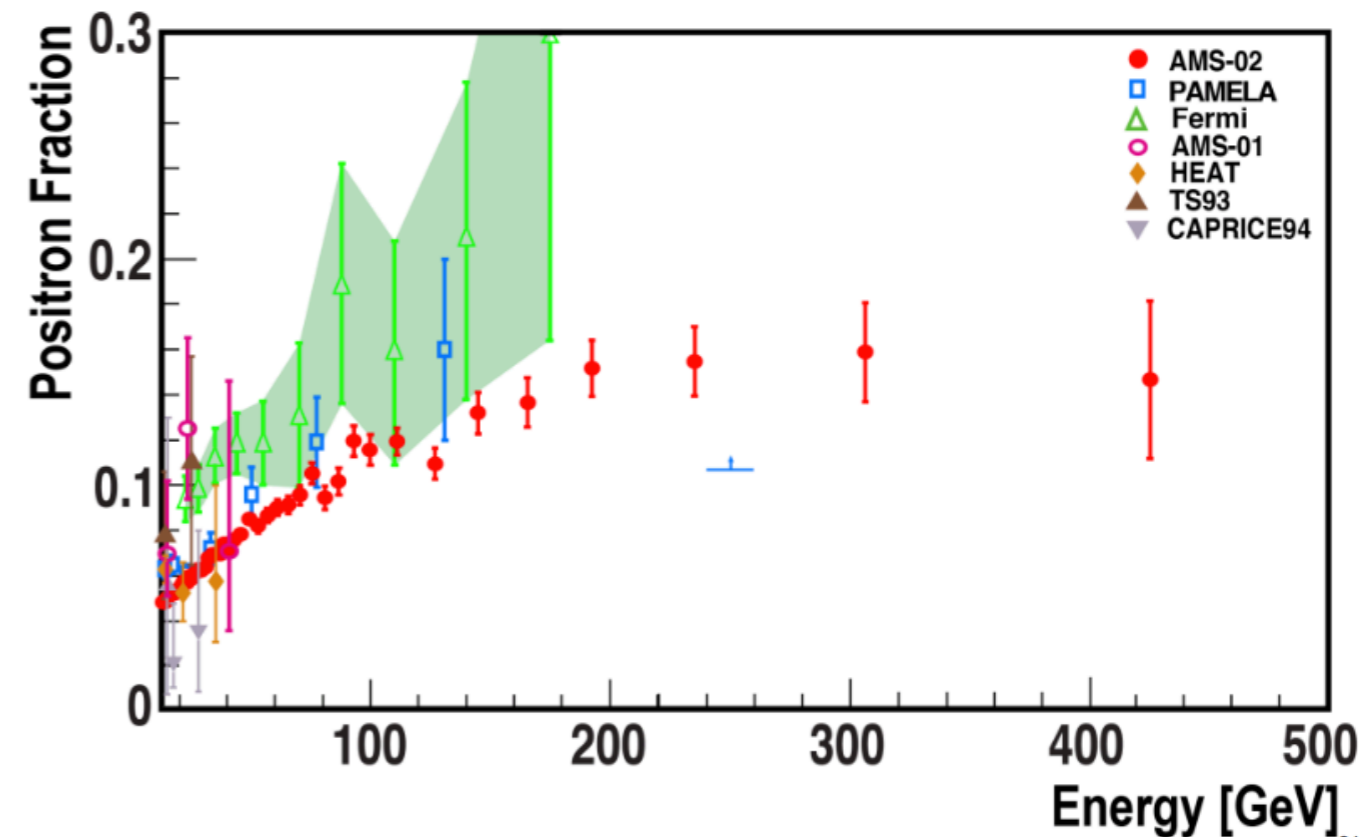
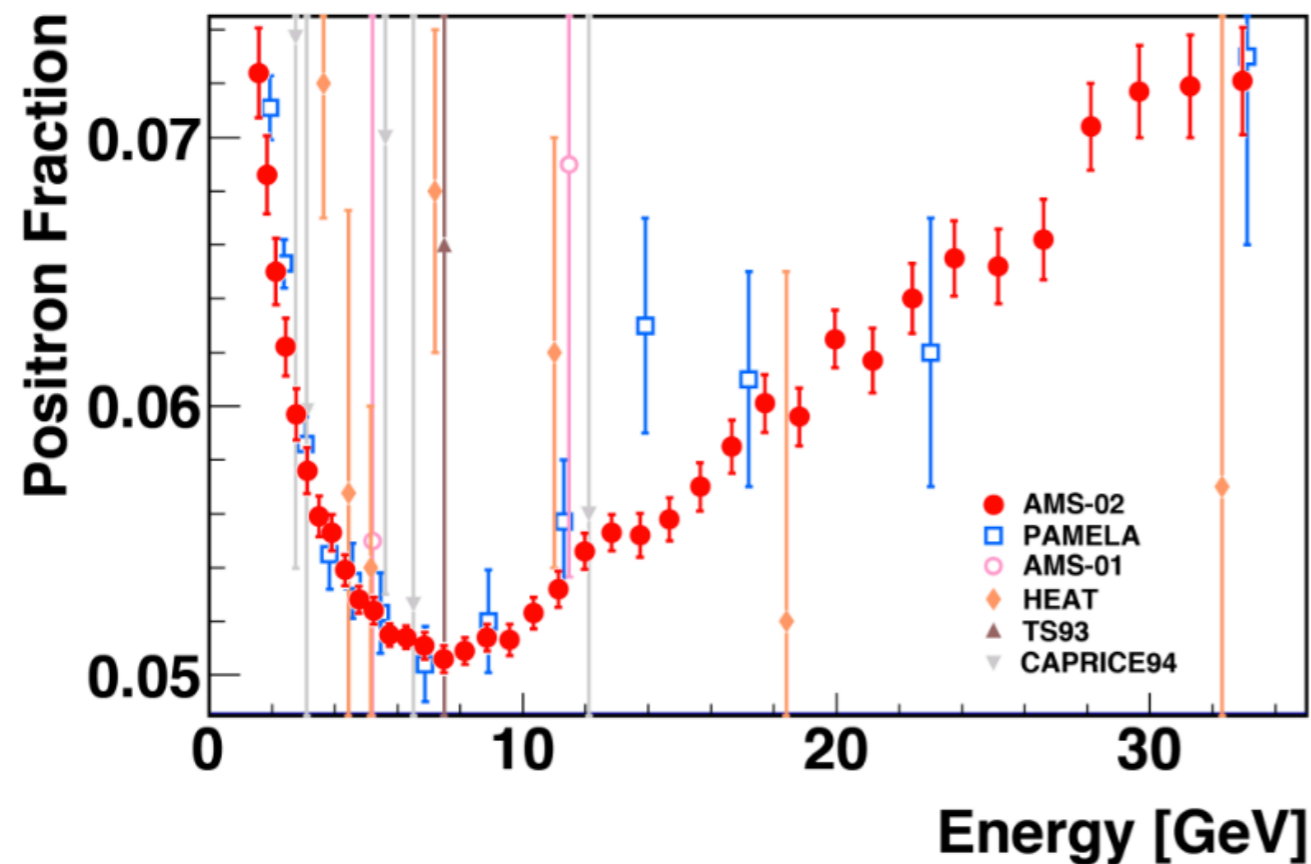
First Result from the Alpha Magnetic Spectrometer on the International Space Station: Precision Measurement of the Positron Fraction in Primary Cosmic Rays of 0.5–350 GeV

[Phys. Rev. Lett. 110, 141102 \(2013\)](#) [†], Citations: **1,055** [†], [View supplemental material and data](#)

AMS-02 : Fraction de positrons

- Confirmation de la remontée du rapport $e^+/(e^+ + e^-)$ avec une mesure de grande précision.
- Extension de la mesure jusqu'à 500 GeV

Phys. Rev. Lett. 110, 141102 (2013)
Phys. Rev. Lett. 113, 121102 (2014)

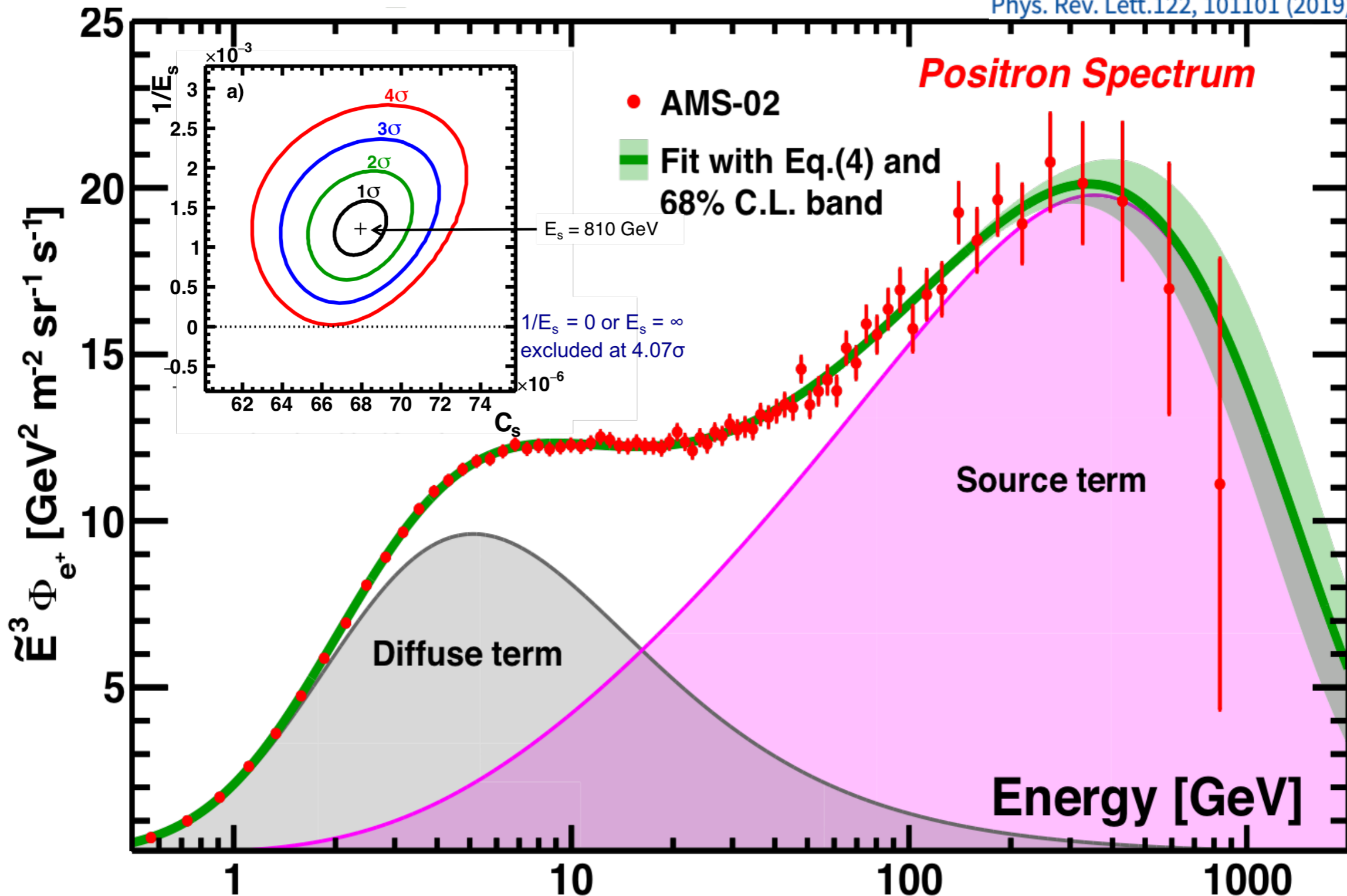


Origine des positrons du RC

$$\Phi_{e^+}(E) = \frac{E^2}{\hat{E}^2} \left[C_d (\hat{E}/E_1)^{\gamma_d} + C_s (\hat{E}/E_2)^{\gamma_s} \exp(-\hat{E}/E_s) \right]$$

Diffuse term Source term

Phys. Rev. Lett.122, 101101 (2019)



Origine des positrons du RC

A sample of papers on AMS data from more than 2300 publications:

- 1) J. Kopp, Phys. Rev. D 88, 076013 (2013);
- 2) L. Feng, R.Z. Yang, H.N. He, T.K. Dong, Y.Z. Fan and J. Chang Phys.Lett. B728 (2014) 250
- 3) M. Cirelli, M. Kadastik, M. Raidal and A. Strumia ,Nucl.Phys. B873 (2013) 530
- 4) M. Ibe, S. Iwamoto, T. Moroi and N. Yokozaki, JHEP 1308 (2013) 029
- 5) Y. Kajiyama and H. Okada, Eur.Phys.J. C74 (2014) 2722
- 6) K.R. Dienes and J. Kumar, Phys.Rev. D88 (2013) 10, 103509
- 7) L. Bergstrom, T. Bringmann, I. Cholis, D. Hooper and C. Weniger, PRL 111 (2013) 171101
- 8) K. Kohri and N. Sahu, Phys.Rev. D88 (2013) 10, 103001
- 9) A. Ibarra, A.S. Lamperstorfer and J. Silk, Phys.Rev. D89 (2014) 063539
- 10) Y. Zhao and K.M. Zurek, JHEP 1407 (2014) 017
- 11) C. H. Chen, C. W. Chiang, and T. Nomura, Phys. Lett. B 747, 495 (2015)
- 12) H. B. Jin, Y. L. Wu, and Y.-F. Zhou, Phys.Rev. D92, 055027 (2015)
- 13) A. Reinert and M. W. Winkler JCAP 01 (2018) 055
- 14) and many other excellent papers ...

Dark Matter explaining the AMS e+ data

- 1) T. Linden and S. Profumo, Astrophys.J. 772 (2013) 18
 - 2) P. Mertsch and S. Sarkar, Phys.Rev. D 90 (2014) 061301
 - 3) I. Cholis and D. Hooper, Phys.Rev. D88 (2013) 023013
 - 4) A. Erlykin and A.W. Wolfendale, Astropart.Phys. 49 (2013) 23
 - 5) P.F. Yin, Z.H. Yu, Q. Yuan and X.J. Bi, Phys.Rev. D88 (2013) 2, 023001
 - 6) A.D. Erlykin and A.W. Wolfendale, Astropart.Phys. 50-52 (2013) 47
 - 7) E. Amato, Int.J.Mod.Phys.Conf.Ser. 28 (2014) 1460160
 - 8) P. Blasi, Braz.J.Phys. 44 (2014) 426
 - 9) D. Gaggero, D. Grasso, L. Maccione, G. DiBernardo and C Evoli, Phys.Rev. D89 (2014) 083007
 - 10) M. DiMauro, F. Donato, N. Fornengo, R. Lineros and A. Vittino, JCAP 1404 (2014) 006
 - 11) K. Kohri, K. Ioka, Y. Fujita, and R. Yamazaki, Prog. Theor. Exp. Phys. 2016, 021E01 (2016)
- and many other excellent papers ...

New Astrophysical Sources explaining the AMS e+ data

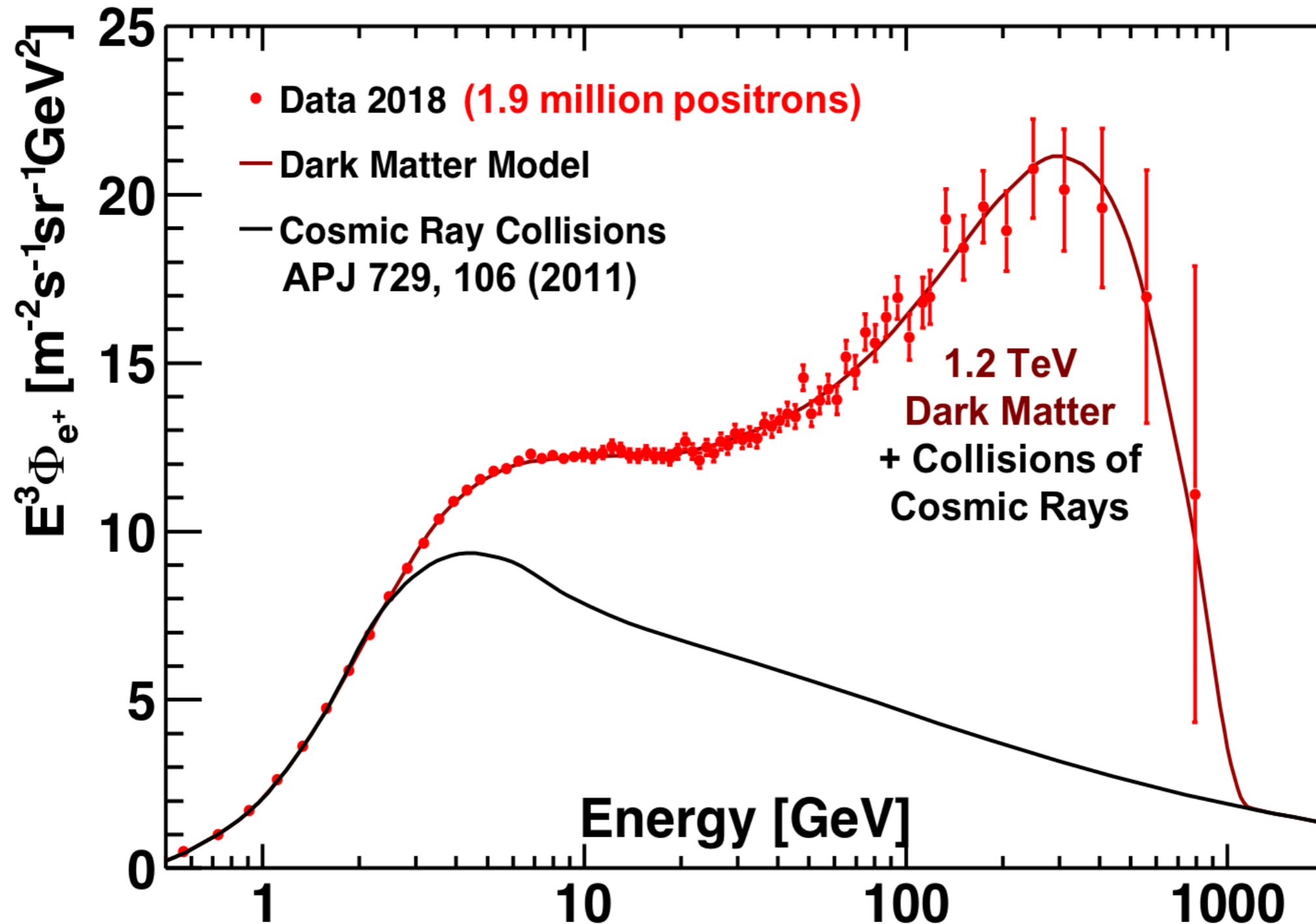
- 1) R.Cowsik, B.Burch, and T.Madziwa-Nussinov, Ap.J. 786 (2014) 124
 - 2) K. Blum, B. Katz and E. Waxman, Phys.Rev.Lett. 111 (2013) 211101
 - 3) R. Kappl and M. W. Winkler, J. Cosmol. Astropart. Phys. 09 (2014) 051
 - 4) G.Giesen, M.Boudaud, Y.Gènolini, V.Poulin, M.Cirelli, P.Salati and P.D.Serpico, JCAP09 (2015) 023;
 - 5) C.Evoli, D.Gaggero and D.Grasso, JCAP 12 (2015) 039.
 - 6) R.Kappl, A.Reinert, and M.W.Winkler, arXiv:1506.04145 (2015)
- and many other excellent papers ...

New Propagation Models explaining the AMS e+ data

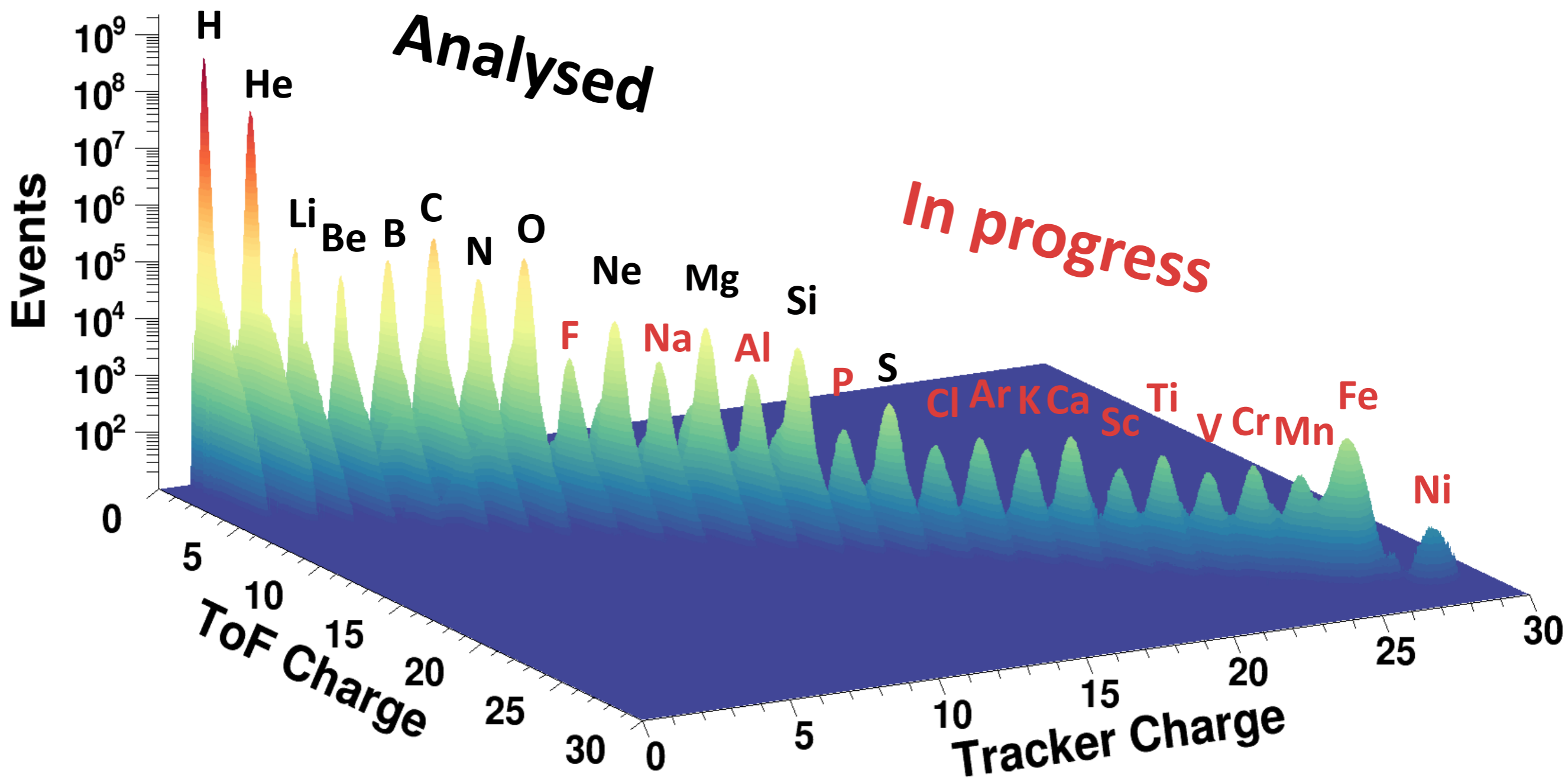
Origine des positrons du RC

Un exemple : modèle de matière noire à 1.2 TeV

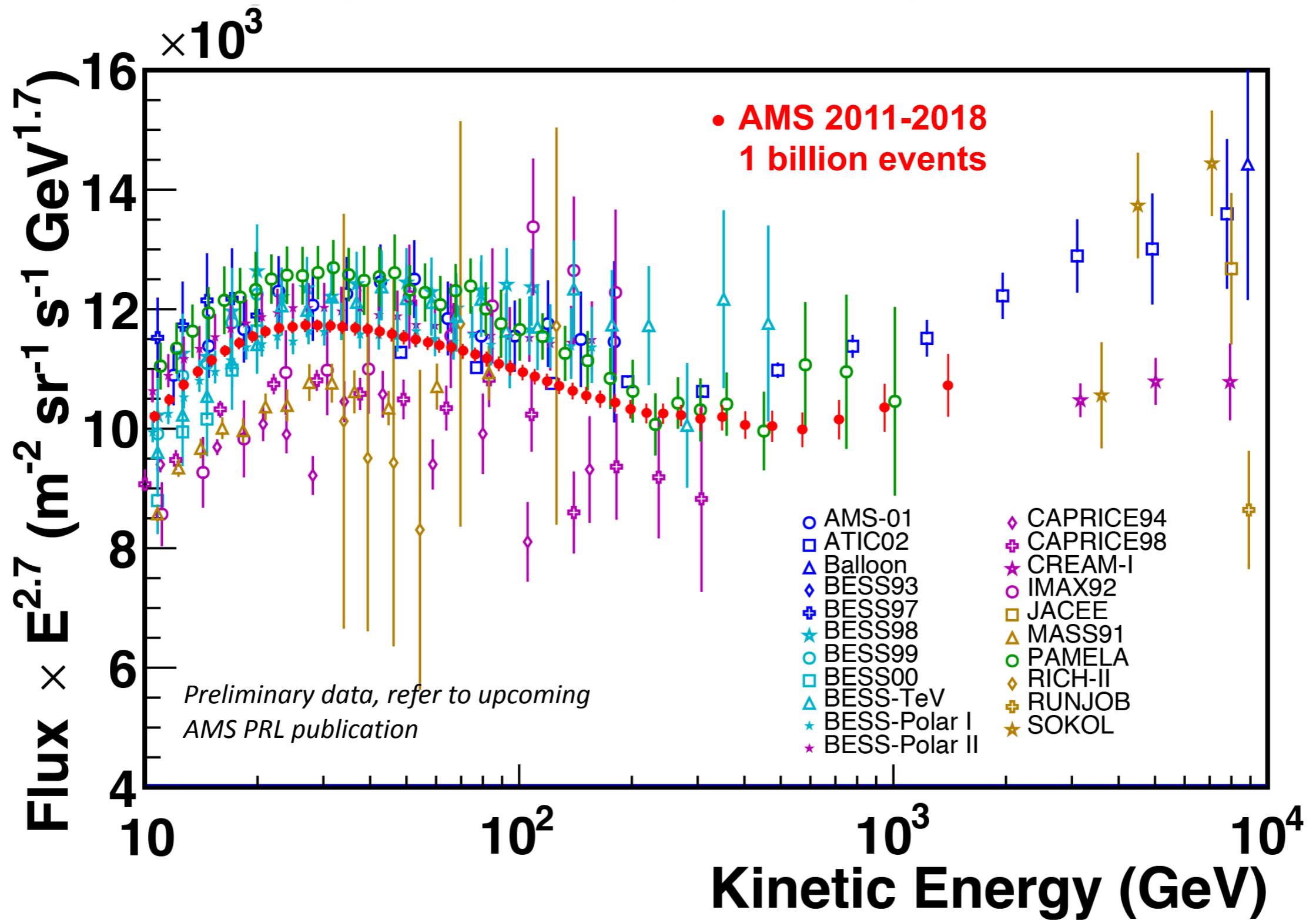
[J. Kopp, Phys. Rev. D 88, 076013 (2013)]



Mesure des charges des éléments du RC par AMS



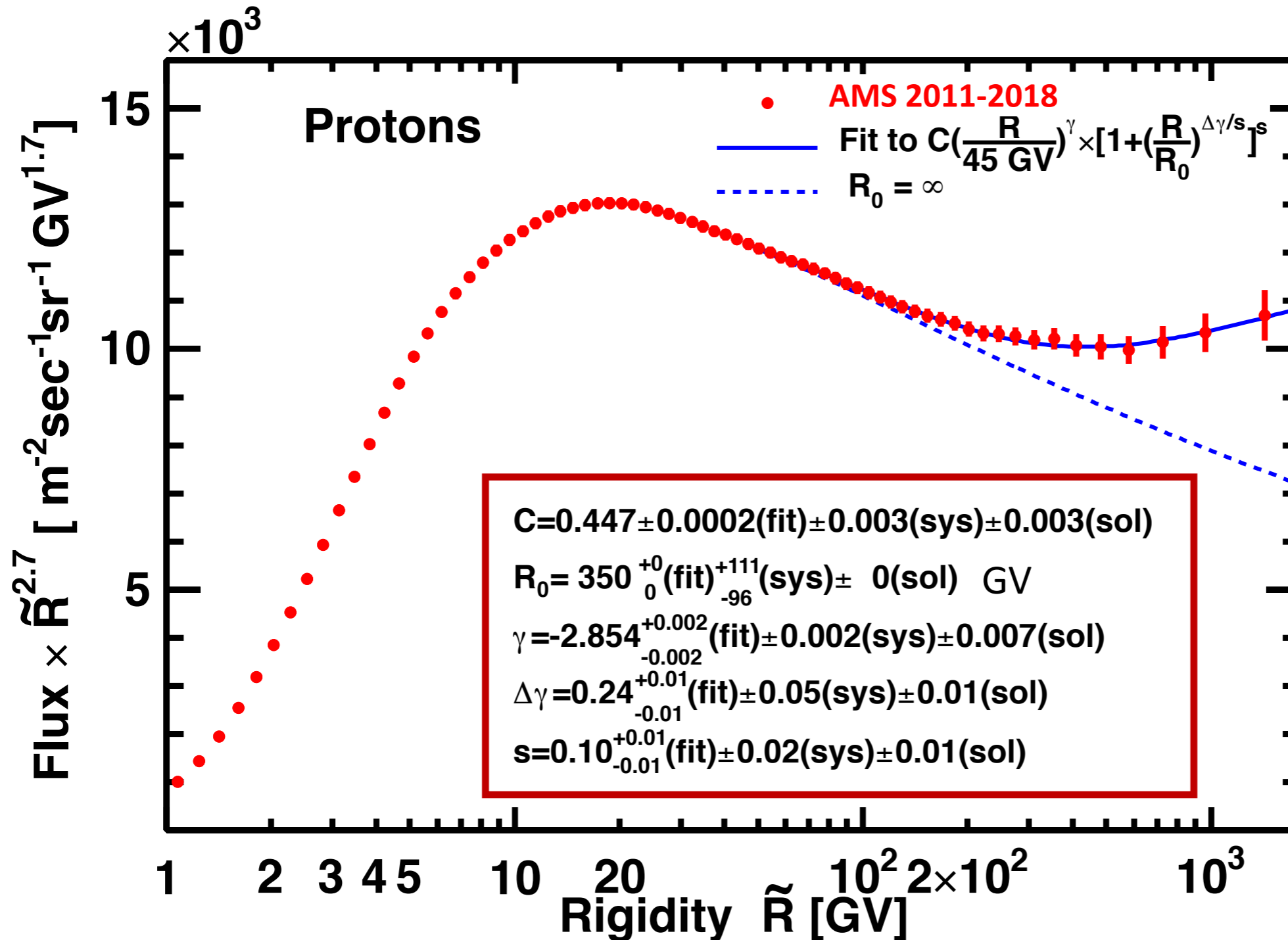
Mesure du spectre de proton par AMS-02



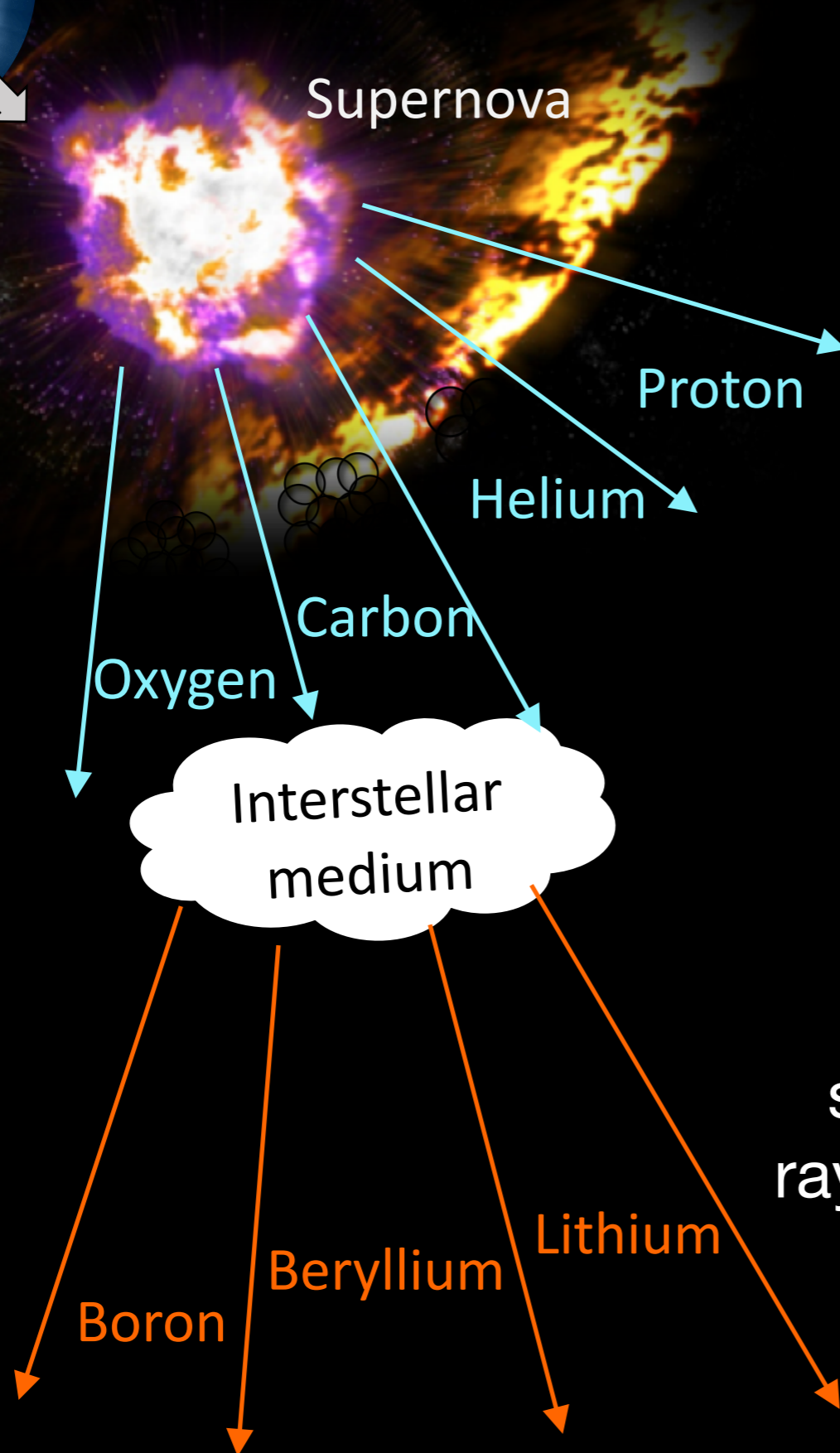
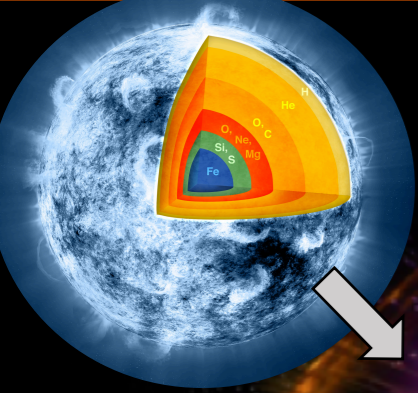
Le flux de proton mesuré présente une déviation à la loi de puissance au-dessus de quelques centaines de GV

Mesure du spectre de proton par AMS-02

La déviation à haute rigidité peut être décrite par une double loi de puissance ($\gamma, \gamma + \Delta\gamma$) avec une transition douce autour de R_0 :



Noyaux du RC galactiques



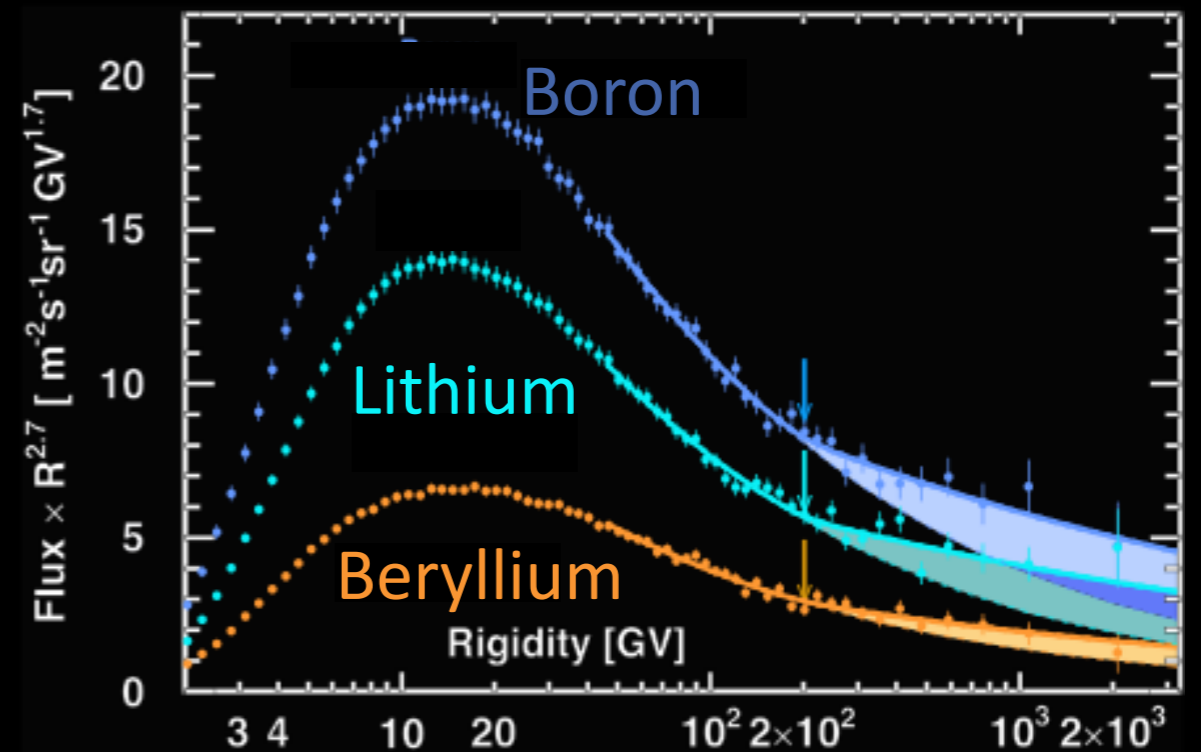
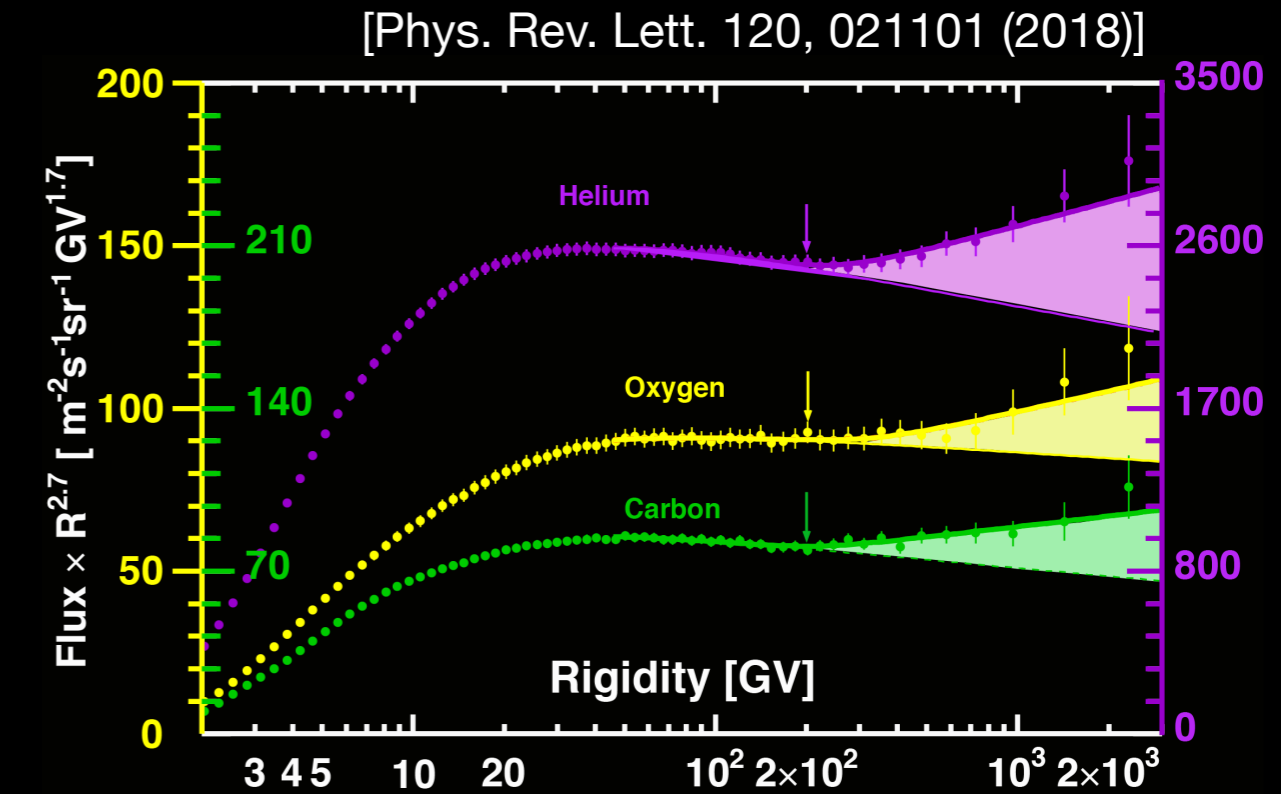
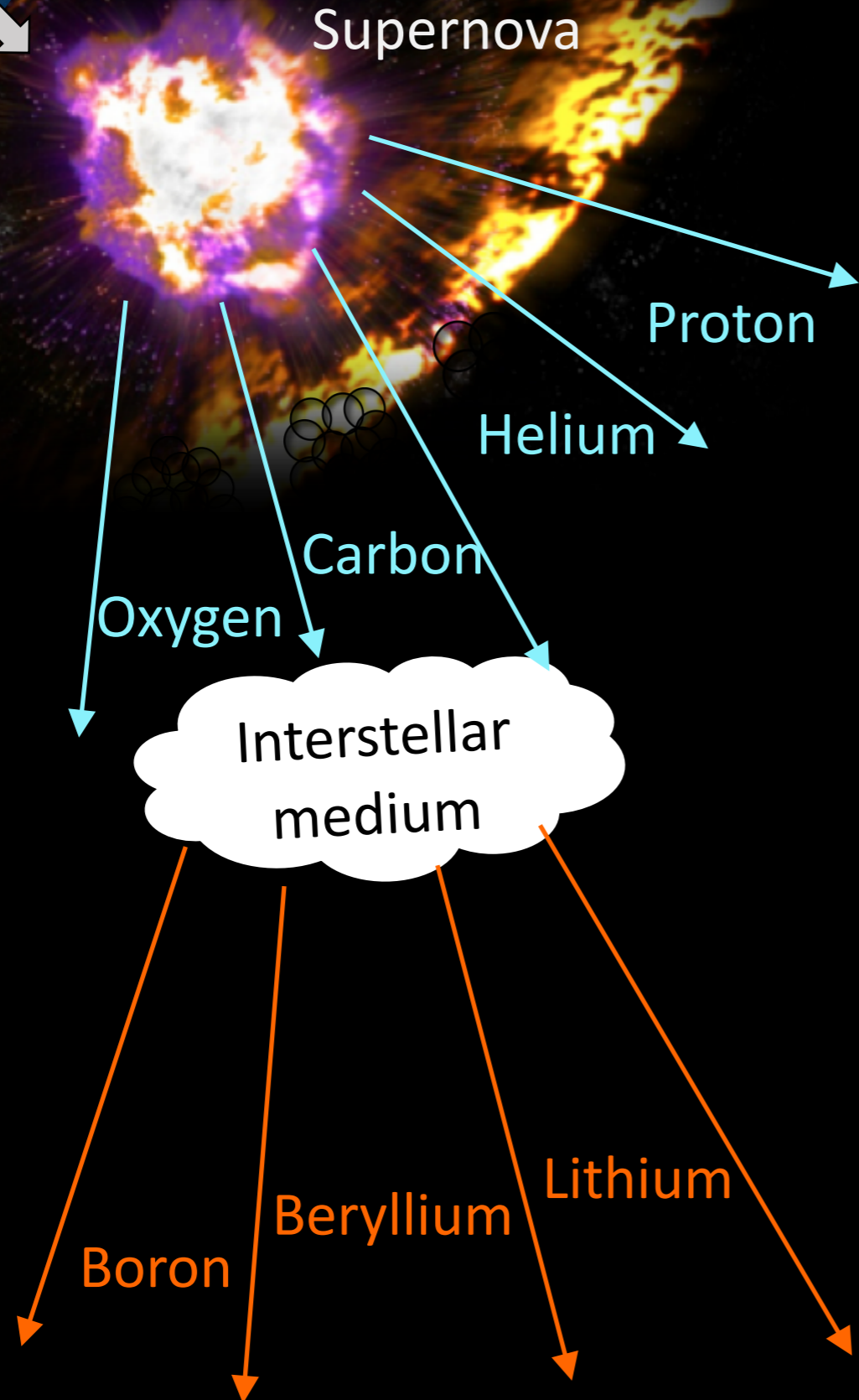
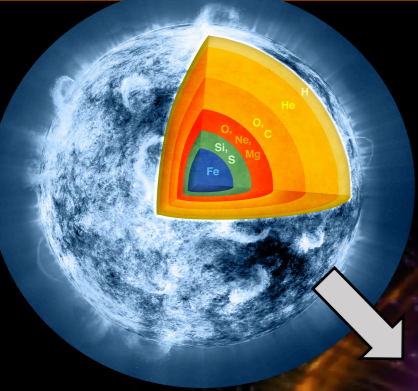
Rayons cosmiques primaires
(H, He, C, O, Ne ..., Fe)
Composante la plus importante
dans le RC.

sont produits pendant le vie de
l'étoile et accélérés dans les chocs
associés à leur explosion
(supernovae)

Rayons cosmiques secondaires
(Li, Be, B, ...)

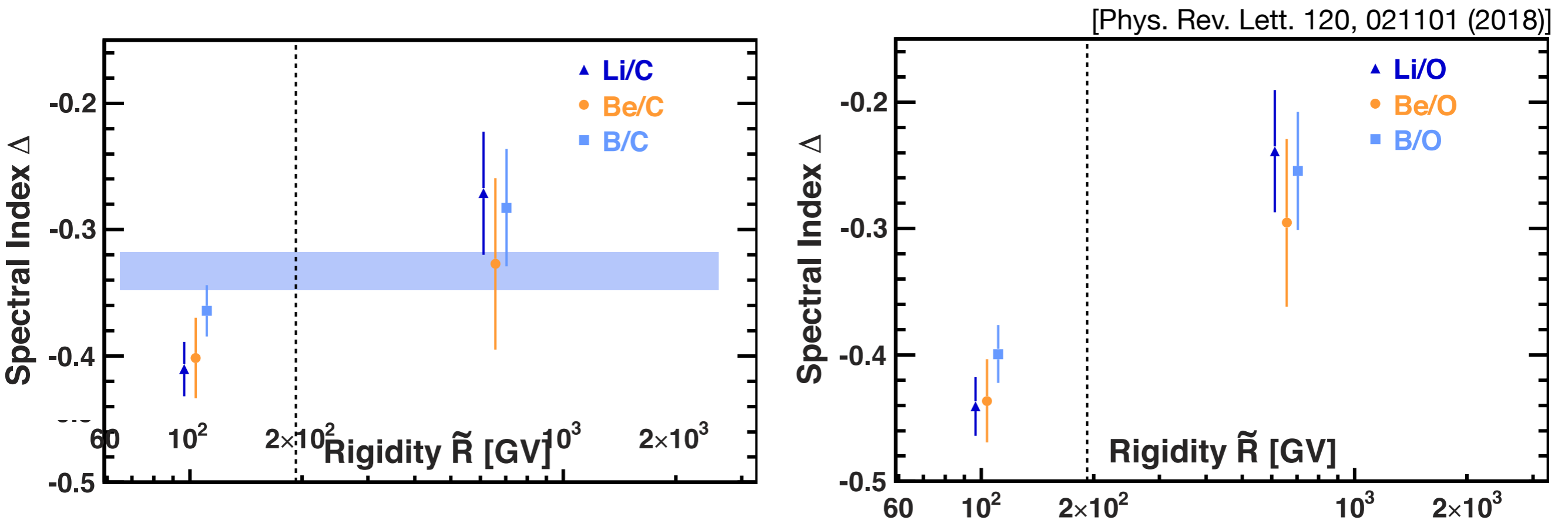
sont produits par fragmentation des
rayons cosmiques primaire sur le milieu
interstellaire

Noyaux du RC galactiques



Rapports secondaires/primaires vs R

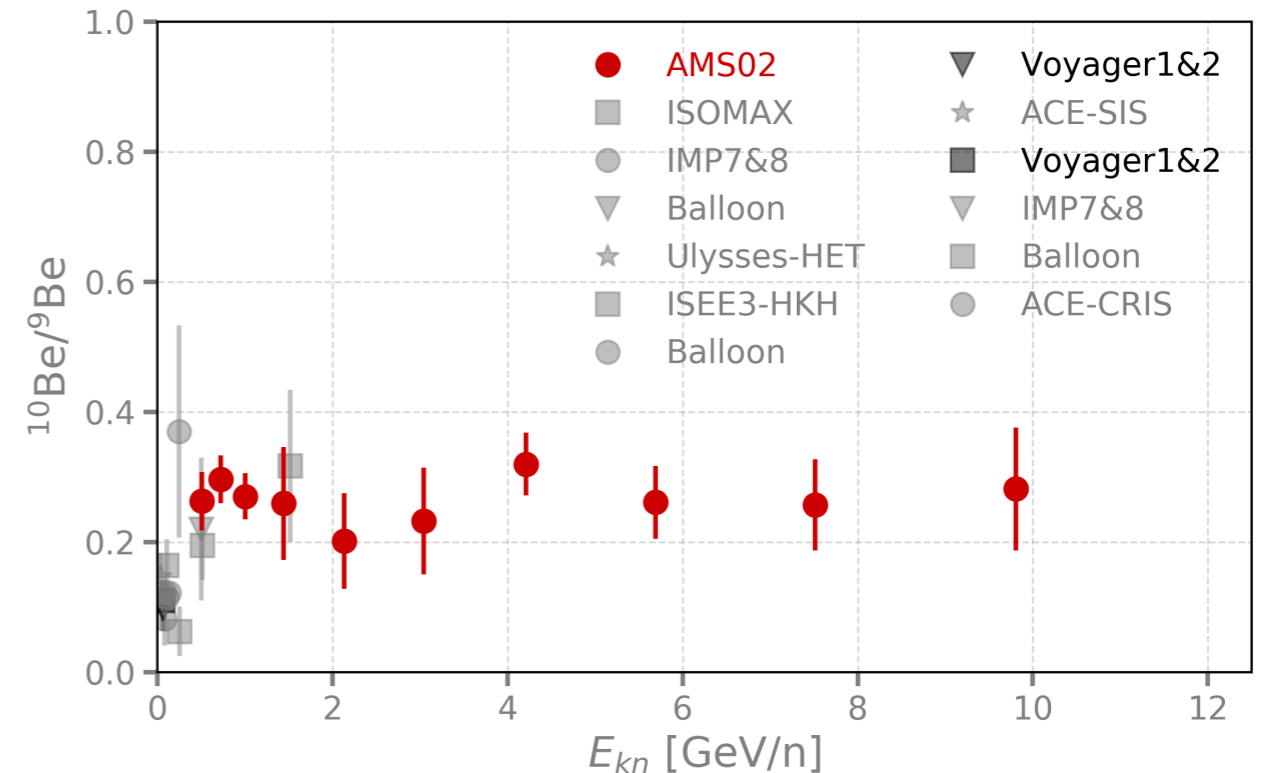
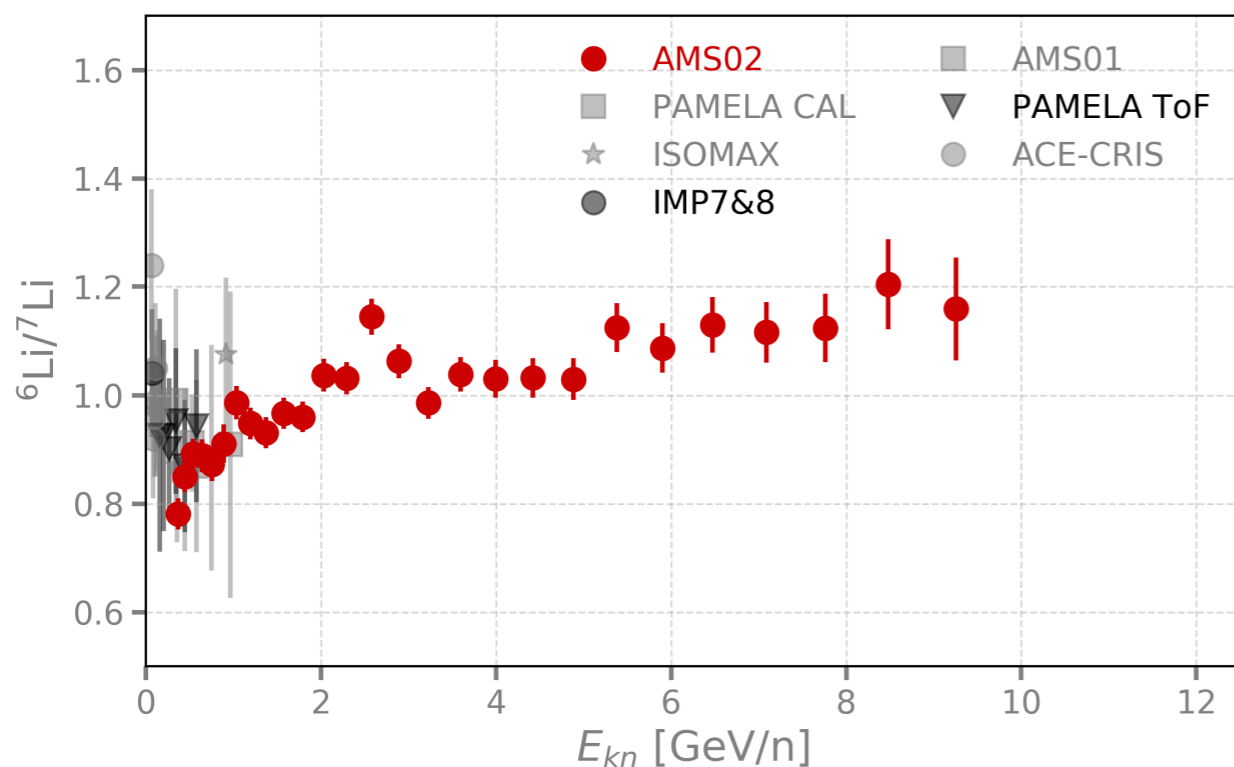
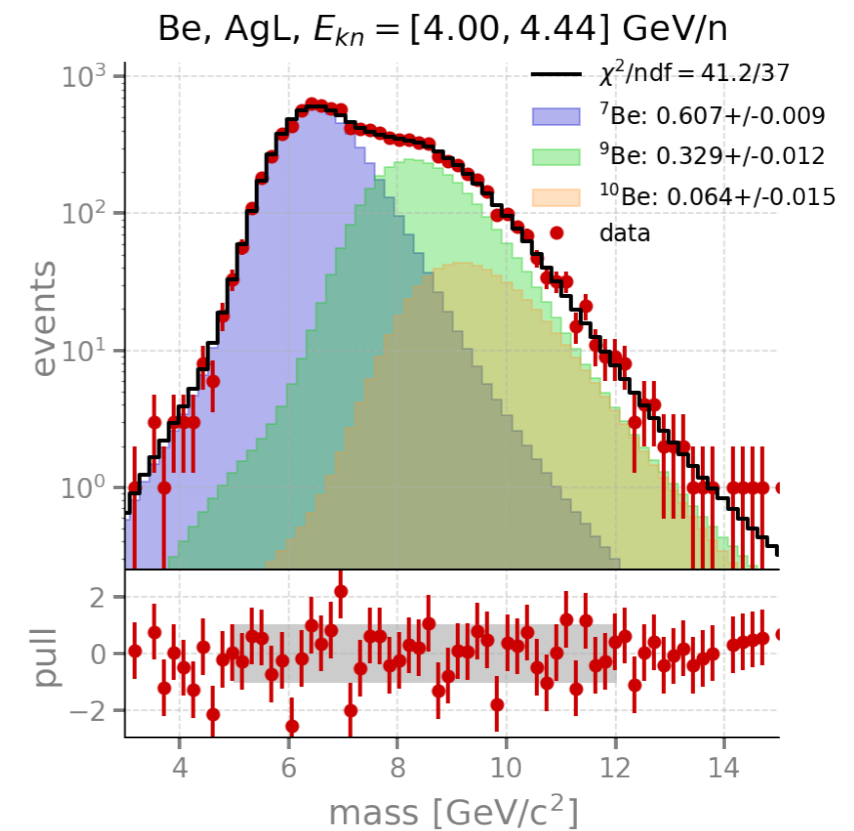
Ajustements de lois de puissance R^Δ pour 2 bins de rigidité [60.3 GV–192 GV] et [192 GV–3300 GV] des rapports Li/C, Be/C, B/C et Li/O, Be/O, B/O :



- Déviation du rapport (toutes les données combinées: 0.13 ± 0.03)
- Supporte une interprétation qui explique le durcissement des spectres comme un changement des propriétés de propagation à haute énergie.

AMS-02 : Mesures isotopiques du RC

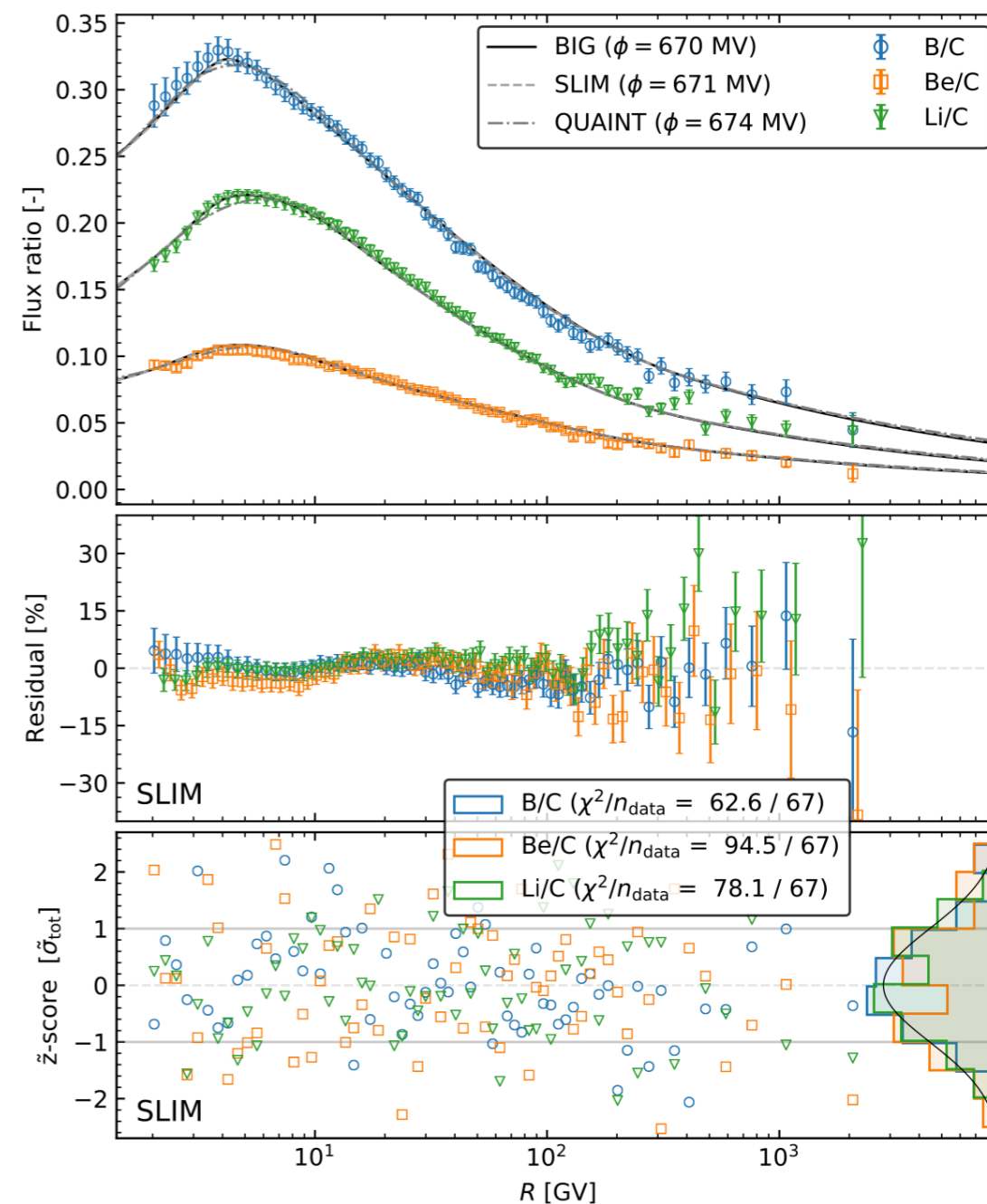
- Masse estimée à partir de la rigidité (Tracker) et de la vitesse (TOF/RICH)
- Ajustement de patrons sur la distribution de masse mesurée
- Analyse en cours, résultats préliminaires présentés en conférences.
- ^{10}Be : radioactif $\tau_{1/2} = 14 \text{ Ma} \rightarrow$ Mesure du temps de confinement du RC dans la Galaxie.



Phénoménologie du RC

- En marge d'AMS, mise en place d'une collaboration LAPP/LAPTh/LPSC/LUPM pour l'exploitation des données d'AMS-02 :
 - Modéliser la propagation du RC : Code USINE <http://lpsc.in2p3.fr/usine> (D. Maurin)
 - Rechercher de contributions matière noire dans les composantes rares du RC.
- Impact important et visibilité des travaux (9 publications), nombreuses contributions en conférences.
- Quelques contributions originales :
 - Traitement des systématiques des données
 - Impact des systématiques du modèle
 - Fit combiné de différentes espèces
 - Production de modèles de propagation de référence.
 - Interprétation de l'excès de positrons en terme de pulsars.
 - Etude du flux secondaire d'antiprotons → pas de place pour la matière noire
 - Synergies pour des nouvelles mesures de sections efficaces (XSCRC19 au CERN)
 - Base de données RC <http://lpsc.in2p3.fr/crdb> (D. Maurin)

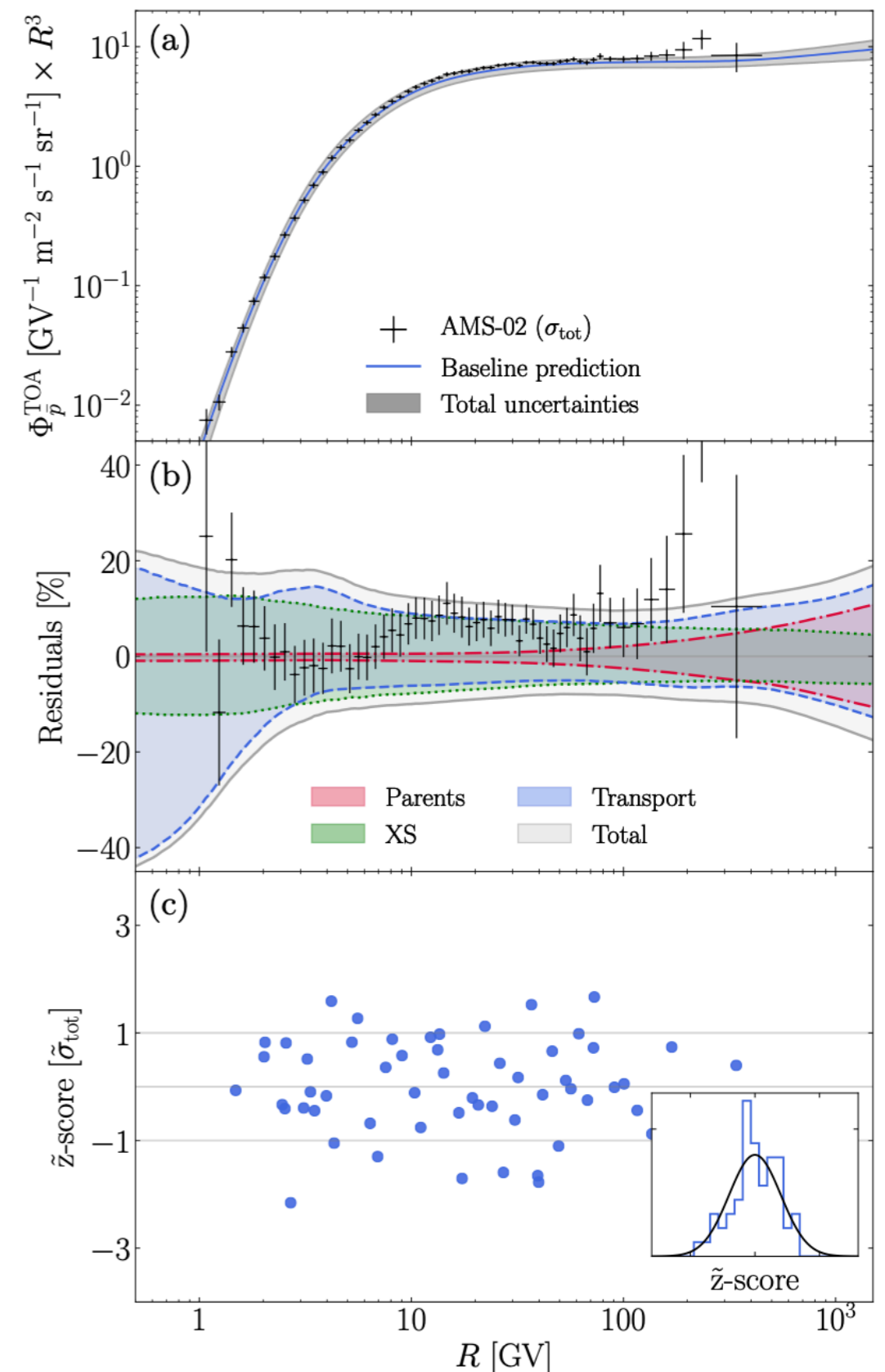
Ajustement des paramètres de propagation du RC sur les mesures AMS-02 du Li, Be, B



Phénoménologie du RC

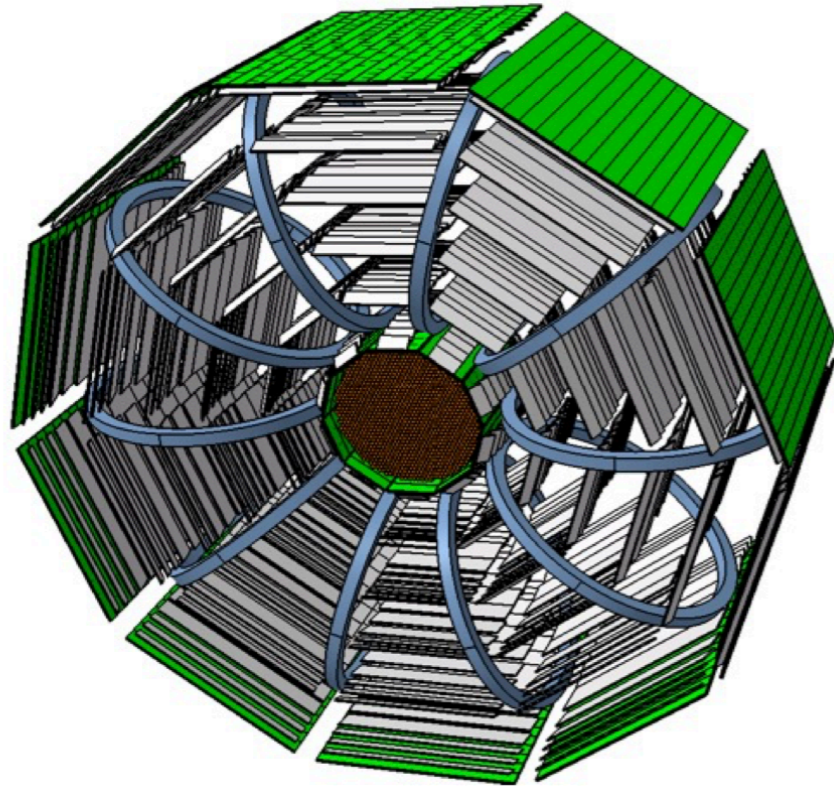
- En marge d'AMS, mise en place d'une collaboration LAPP/LAPTh/LPSC/LUPM pour l'exploitation des données d'AMS-02 :
 - Modéliser la propagation du RC : Code USINE <http://lpsc.in2p3.fr/usine> (D. Maurin)
 - Recherche de contributions matière noire dans les composantes rares du RC.
- Impact important et visibilité des travaux (9 publications), nombreuses contributions en conférences.
- Quelques contributions originales :
 - Traitement des systématiques des données
 - Impact des systématiques du modèle
 - Fit combiné de différentes espèces
 - Production de modèles de propagation de référence.
 - Interprétation de l'excès de positrons en terme de pulsars
 - Etude du flux secondaire d'antiprotons → pas de place pour la matière noire
 - Synergies pour des nouvelles mesures de sections efficaces (XSCRC19 au CERN)
 - Base de données RC <http://lpsc.in2p3.fr/crdb> (D. Maurin)

Comparaison du flux \bar{p} AMS-02 et de la prédiction de \bar{p} secondaires

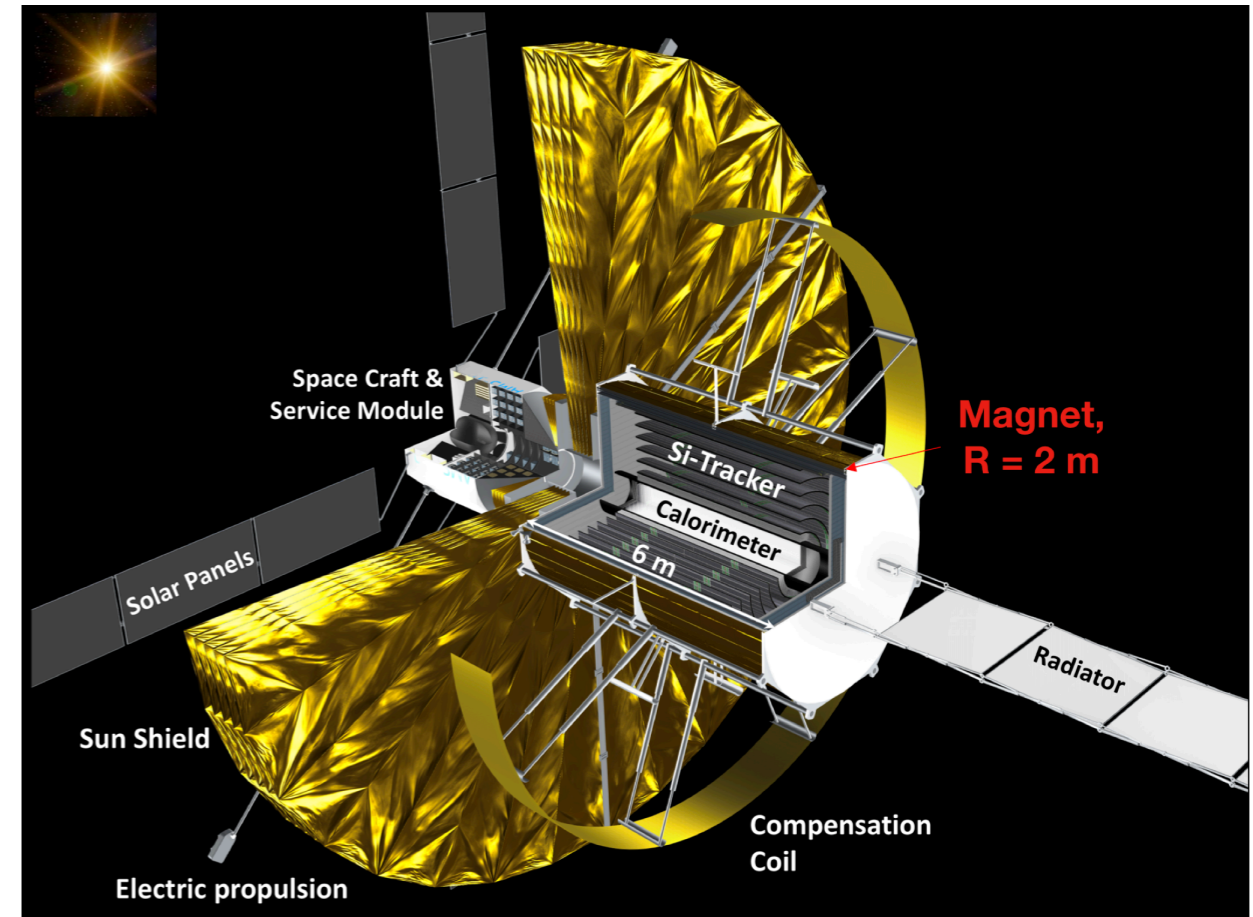


Au-delà d'AMS : Appel ESA Voyage 2050

ALADInO (R. Battiston)



AMS-100 (S. Schael)



Calorimeter acceptance	$\sim 9 \text{ m}^2 \text{ sr}$
Spectrometer acceptance	$> 10 \text{ m}^2 \text{ sr}$ ($\sim 3 \text{ m}^2 \text{ sr}$ w/i CALO)
Spectrometer Maximum Detectable Rigidity (MDR)	$> 20 \text{ TV}$
Calorimeter depth	$61 X_0, 3.5 \lambda_I$
Calorimeter energy resolution	25% ÷ 35% (for nuclei) 2% (for electrons and positrons)
Calorimeter e/p rejection power	$> 10^5$
Time of Flight measurement resolution	$\sim 100 \text{ ps}$
High energy γ -ray acceptance (Calorimeter)	$\sim 9 \text{ m}^2 \text{ sr}$
Low energy γ -ray acceptance (Tracker)	$\sim 0.5 \text{ m}^2 \text{ sr}$
γ -ray Point Spread Function	$< 0.5 \text{ deg}$

Acceptance	$100 \text{ m}^2 \text{ sr}$
MDR	100 TV for $ Z = 1$
Material budget of main solenoid	$0.12 X_0$
Calorimeter depth	$0.012 \lambda_I$
Energy reach	$70 X_0, 4 \lambda_I$ 10^{16} eV for nucleons 10 TeV for e^+, \bar{p} 8 GeV/n for \bar{D}
Angular resolution	$4''$ for photons at 1 TeV $0''.4$ for photons at 10 TeV

AMS : retour d'expérience (1/2)

AMS projet spatial unique:

- Projet construit autour d'une communauté avec une expertise forte de l'instrumentation HE mais sans expérience spatiale.
- Partage du financement et des responsabilités entre la NASA et la DOE : la collaboration responsable de la réalisation de l'instrument et son opération, le retour scientifique.
- Retour scientifique majeur: mesures de précision de l'ensemble des composantes du RC, renouvelle la discipline du RC → Mesures de référence pour les prochaines décennies.
- Rôle majeure du précurseur AMS-01 pour le projet, bien au-delà de la validation des concepts instrumentaux :
 - Crédibilité de la collaboration auprès des agences.
 - Préparation de l'analyse.
 - Premiers retours scientifiques, nombreuses publications.
 - Renforce la visibilité et l'attractivité du projet, essentiel pour la formation des étudiants.
 - Rôle clé pour consolider une collaboration malgré les délais et un futur qui a été longtemps compromis.

AMS : retour d'expérience (2/2)

Contribution française dans AMS :

- Taille des groupes modeste mais impact majeur dans la collaboration.
- Soutien IN2P3 et CNES qui nous a permis de pleinement participer au retour scientifique.
- Forts liens avec des théoriciens (LAPP/LAPTh/LPSC/LUPM) : atout important pour notre contribution au retour scientifique d'AMS-02.
- Incertitude sur le futur d'AMS-02 entre 2003 et 2009 : phase de construction et d'intégration qui a été aussi mise à profit pour initier des participations dans d'autres projets :
 - Valoriser les compétences et préparer l'analyse d'AMS (CREAM)
 - Développer une expertise dans la phénoménologie du RC.
 - Maintenir les groupes et préparer le futur (HESS, LSST).

FIN

AMS-02 France : ETP et financements

- ETP fortement variés au cours du projet :
 - 10-20 ETP au maximum de la phase de construction (2001-2007).
 - ~8 ETP à partir de 2011 : investissement important sur le retour scientifique (PostDoc IN2P3, Labex ENIGMASS, Thèses)
 - Fin de l'activité AMS au LUPM en 2014.
 - Baisse progressive de l'activité à partir de 2015 (migration vers HESS/CTA, LSST)
 - Fin de l'activité AMS au LAPP en 2019, reste co-auteur des papiers.
 - 2020 : 2 personnes au LPSC ~1 ETP
- Financements :
 - Construction (avant 2003). **Financement IN2P3, CNES, région Rhones-Alpes, Pays de Savoie**
 - Missions et Shifts : 50 k€/an (2011) → 7 k€/an (2020). **Financement IN2P3, CNES.**
 - Fond commun AMS : 50 k€/an (2011) → 15 k€/an (2020). **Financement IN2P3.**
- 13 thèses depuis 2003. **Financements UGA et USMB.**
- 5 Postdoc 1-3 ans. **Financement IN2P3, CNES, Labex ENIGMASS**
- Activité Phéno RC. Projet PHENOD 2018-2020 6k€/an. **Financement IN2P3**

AMS-02 France : Chercheurs

Depuis 2003 :

- **LAPP Annecy** : L. Basara (PhD-14), P. Brun (PhD-07), S. Caroff (PhD-16), G. Coignet (CNRS), J. Feng (PhD-18), A. Fiasson (CNRS), L. Girard (PhD-04), C. Goy (CNRS), R. Kossakowski (USMB), J. Pochon (PhD-05), V. Poireau (CNRS), M. Panniccia (PostDoc IN2P3), S. Rosier-Lees (CNRS), L. Tao (PhD-15), M. Vecchi (PostDoc CNES), J-P. Vialle (CNRS)
- **LPSC Grenoble** : B. Baret (PhD-04), A. Barrau (UGA), V. Bonnivard (PhD-16), G. Boudoul (PhD-03), M. Buénerd (CNRS), L. Derome (UGA), W. Gillard (PostDoc IN2P3), A. Guelfi (PhD-16), M. Mangin-Brinet (CNRS), D. Maurin (CNRS), J.S. Ricol (CNRS), Y. Sallaz-Damaz (PhD-08), N. Tomassetti (PostDoc ENIGMASS), M. Vargas Trevino (PhD-05)
- **LUMP Montpellier** : A. Jacholkowska (CNRS), C. Zurbach (CNRS).

