

# **Astroparticelle nello Spazio: fisica fondamentale e applicazioni**

**Nicola Tomassetti**

**Kick-off Meeting del Piano Triennale della Ricerca e  
Terza Missione del Dipartimento di Fisica e Geologia**

# Astroparticelle nello Spazio: fisica fondamentale e applicazioni



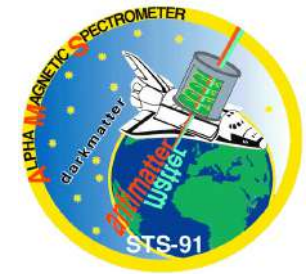
Bruna Bertucci, Enrico Catanzani, Emanuele Fiandrini, Maura Graziani,  
Lorenzo Mussolin, Michele Pauluzzi, Nicola Tomassetti (UniPG)  
Giovanni Ambrosi, Federico Donnini, Matteo Duranti, Maria Ionica, (INFN)

**Fisica fondamentale**  
ricerca di antimateria  
primordiale e materia oscura

**Astrofisica dei raggi cosmici**  
accelerazione, trasporto e  
interazioni di particelle

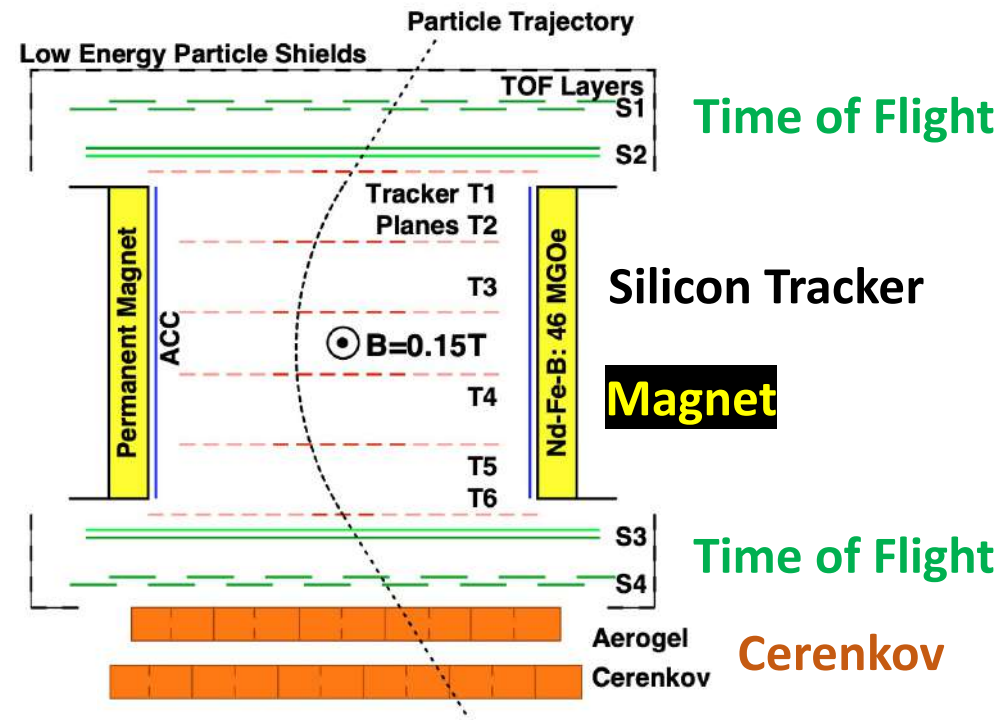
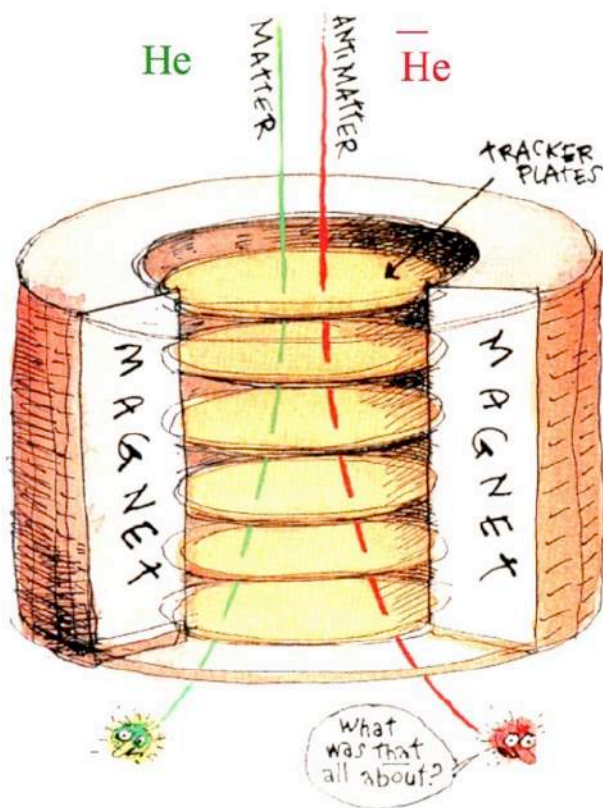
**Eliosfera e space weather**  
radiazione nello spazio  
circumterrestre e interplanetario.

- ✓ *Ambito 2 – Astrofisica delle alte energie e Astroparticelle*
- ✓ *Ambito 4 – Scienze e tecnologie per lo Spazio*



# La fisica delle particelle va nello Spazio: AMS-01

- Spettrometro per rivelare antimateria nello spazio [Ahlen et al. NIM A 350, 351 (1994)]
- AMS-01 test flight: missione STS-91 su space shuttle Discovery, **2-12 giugno 1998**
- Misure di nuclei, leptoni, antiparticelle, antinuclei, radiazione LEO a energie 0.1-100 GeV
- Validazione concept, esperienza e know-how per la realizzazione di AMS-02 sulla ISS

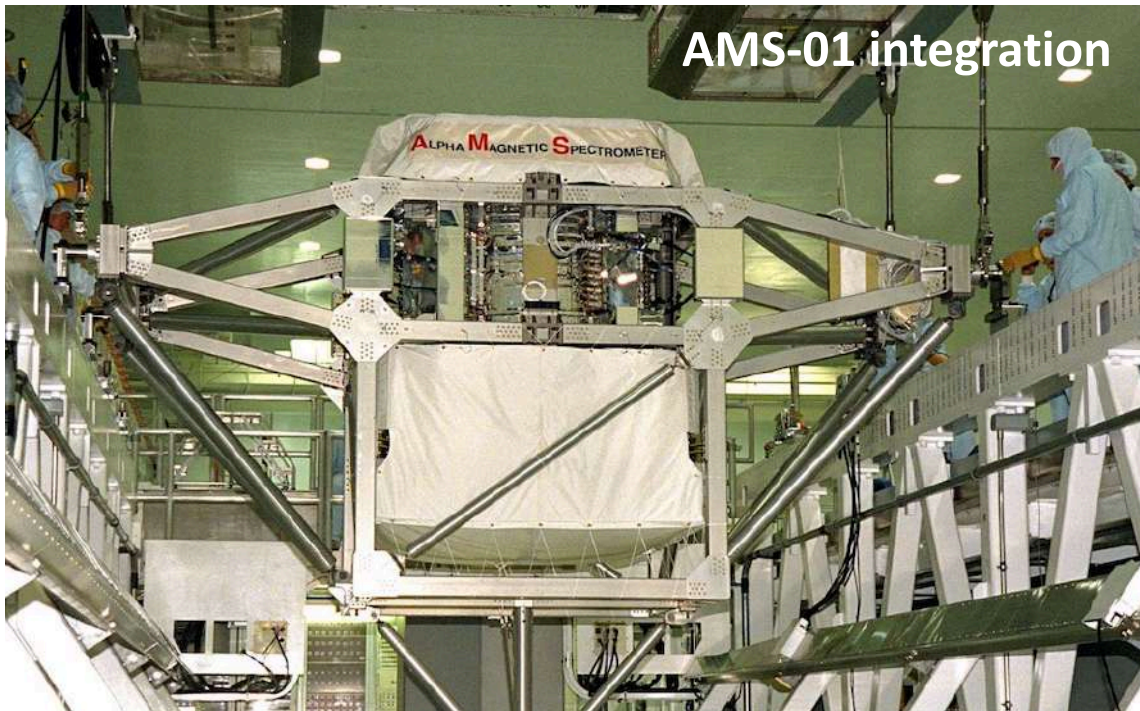




# La fisica delle particelle va nello Spazio: AMS-01



- Spettrometro per rivelare antimateria nello spazio [Ahlen et al. NIM A 350, 351 (1994)]
- AMS-01 test flight: missione STS-91 su space shuttle Discovery, **2-12 giugno 1998**
- Misure di nuclei, leptoni, antiparticelle, antinuclei, radiazione LEO a energie 0.1-100 GeV
- Validazione concept, esperienza e know-how per la realizzazione di AMS-02 sulla ISS





# La fisica delle particelle va nello Spazio: AMS-01

## Risultati scientifici di AMS-01

J. Alcaraz et al., *Physics Reports* 366: 331–405, 2002 [[report](#)]  
J. Alcaraz et al., *Phys. Lett.B* 461:387-396, 1999 [[antielio](#)]  
J. Alcaraz et al., *Phys. Lett.B* 494:193-202, 2000 [[elio](#)]  
J. Alcaraz et al., *Phys. Lett.B* 490:27-35, 2000 [[protoni](#)]  
J. Alcaraz et al. *Phys. Lett.B* 484:10-22, 2000, [[leptoni](#)]  
J. Alcaraz et al. *Phys. Lett.B* 472:215-226, 2000 [[protoni](#)]  
M. Aguilar et al. *Nucl. Instrum. Meth. B* 234, 321-332, 2005 [[pioni](#)]  
M. Aguilar et al. *Phys. Lett. B* 646:145-154, 2007 [[positroni](#)]

|                                                                                                              |           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| M. Aguilar et al. <i>Astrophysical Journal</i> 724, 329, 2010 [ <a href="#">nuclei</a> ]                     | <b>PG</b> |
| M. Aguilar et al. <i>Astrophysical Journal</i> 736, 105, 2011 [ <a href="#">isotopi</a> ]                    |           |
| P. Zuccon et al., 2003, <i>Astropart.Phys.</i> 20:221-234,2003 [ <a href="#">RC atmosferici</a> ]            |           |
| E. Fiandrini et al., 2002, <i>J. of Geo. Res.</i> 107,A6 10, 2002 [ <a href="#">leptoni intrappolati</a> ]   |           |
| E. Fiandrini et al., 2003, <i>J. of Geo. Res.</i> 108, A11 1402, 2003 [ <a href="#">leptoni nella SAA</a> ]  |           |
| E. Fiandrini et al., 2004, <i>J. of Geo. Res.</i> 109, A10214, 2004 [ <a href="#">protoni intrappolati</a> ] |           |

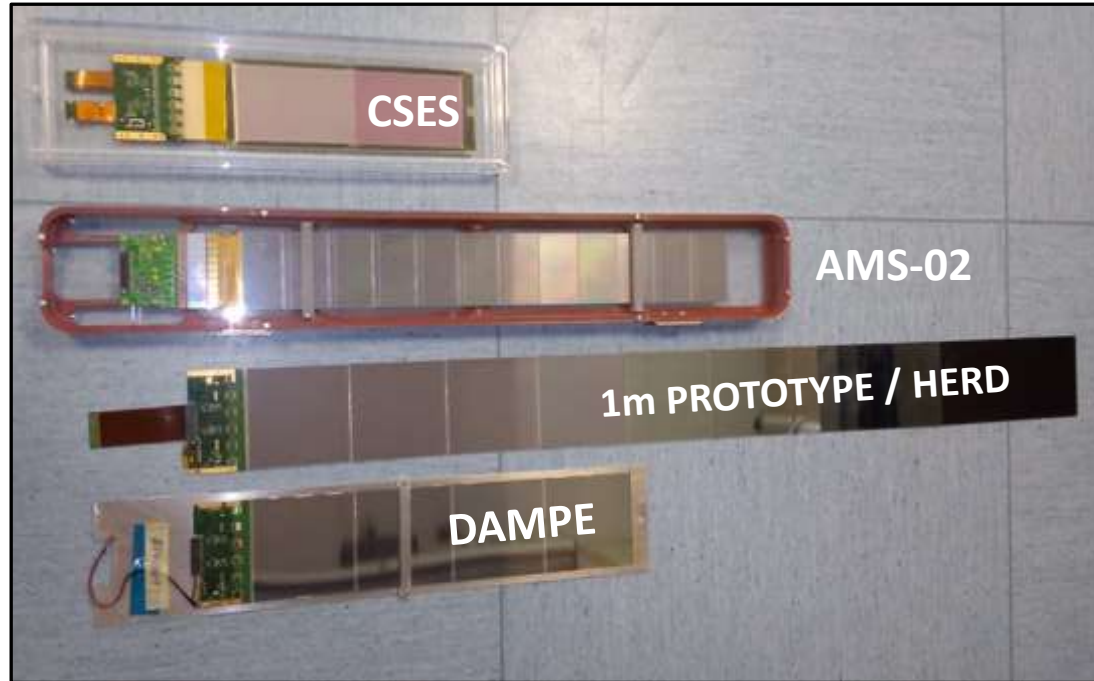


# L'Eredità di AMS-01

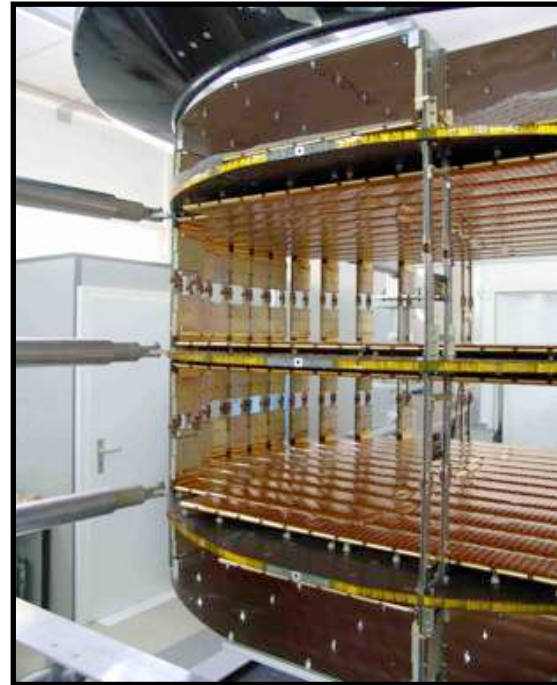


- Validazione e know-how su **spettrometria magnetica nello spazio**
- La «filiera» dei rivelatori a microstrip di **silicio** per esperimenti nello spazio
- Attività di **outreach e didattiche** con gli scintillatori o con i ladder di AMS-01.

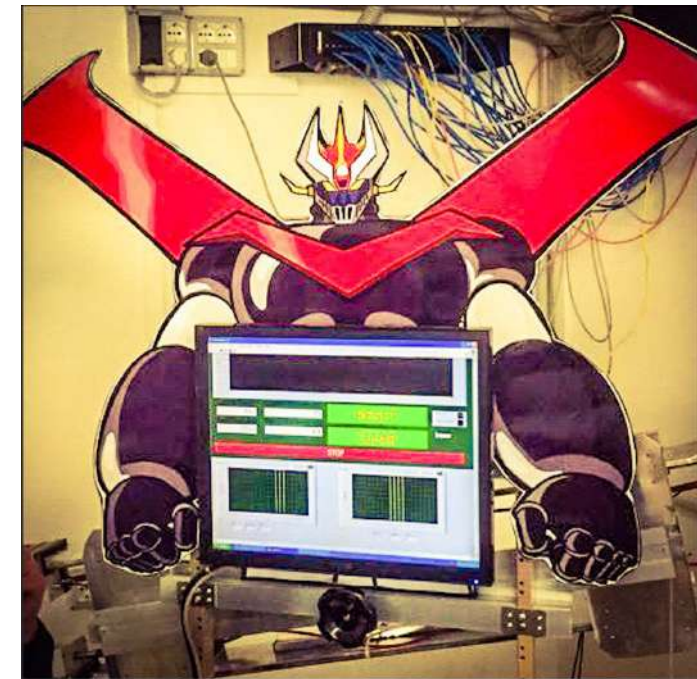
*La filiera dei rivelatori al silicio*



*Inside the AMS tracker*



*Mazinga the  $\mu$ -detector*

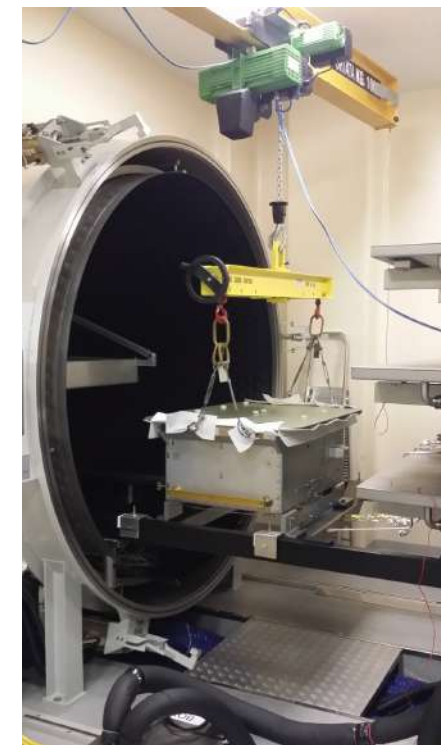


# Il laboratorio S.E.R.M.S.



## Laboratorio per lo Studio degli Effetti delle Radiazioni sui Materiali per lo Spazio

- Da fine anni 90, presso il Polo Scientifico e Didattico UniPG di Terni.
- Qualifica spaziale di strumenti e applicazioni per lo spazio
- Simulatori stress meccanici & termici. Banco vibrante, camera bianca, camera climatica, lab criogenia
- Fermi-LAT, ALTEA, Aurora/MegaSat1, AMS-02, Dampe, CSES (...) ==> eXTP, CubeSat [Dip Ingegneria]





# L'esperimento AMS-02



Un osservatorio spaziale per la misura diretta dei raggi cosmici a energie GeV-TeV  
a bordo della Stazione Spaziale Internazionale (ISS) dal Maggio 2011



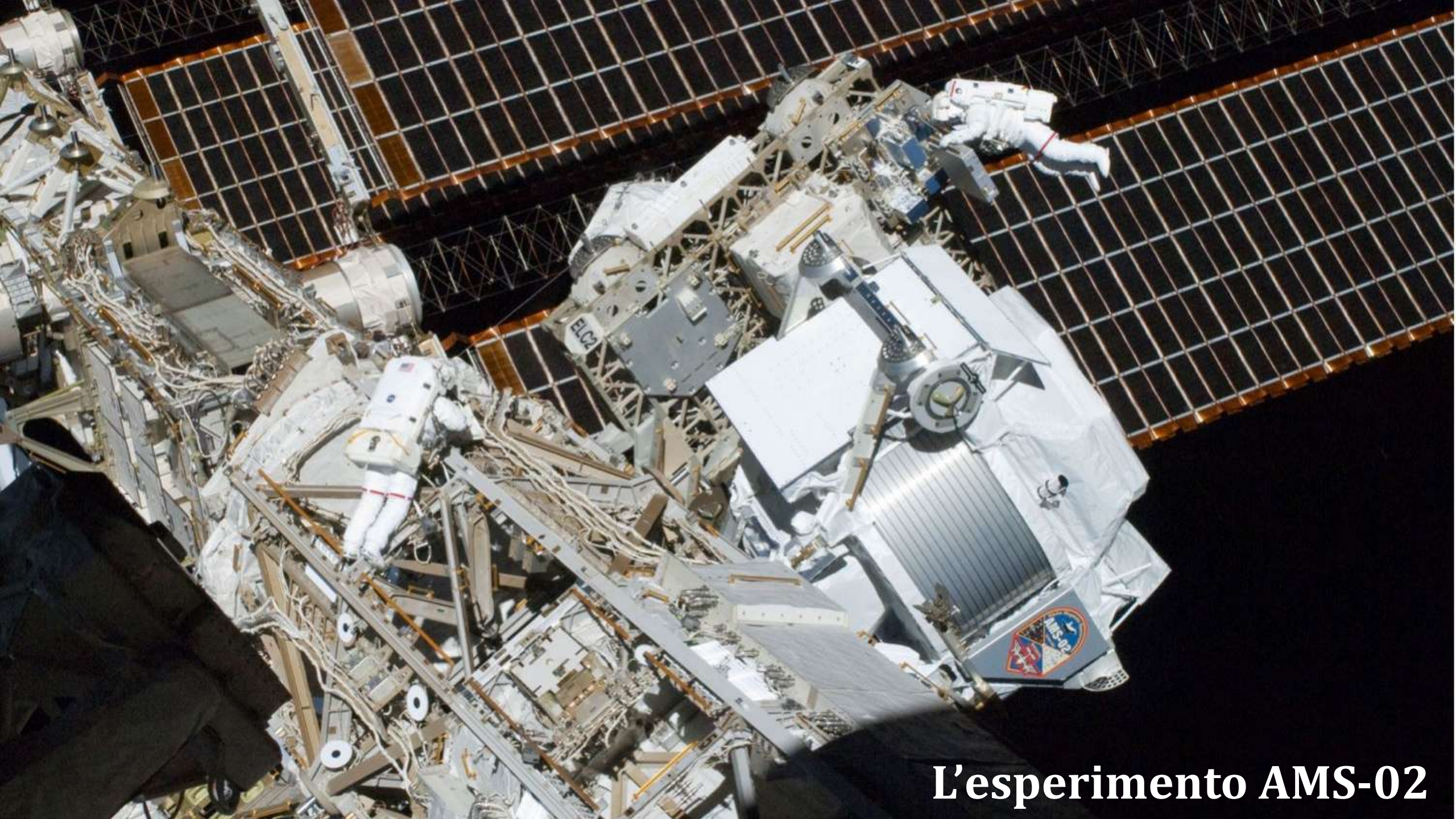
→ In presa dati continua dal 19 Maggio 2011 >> sulla ISS almeno fino al 2030



# L'esperimento AMS-02



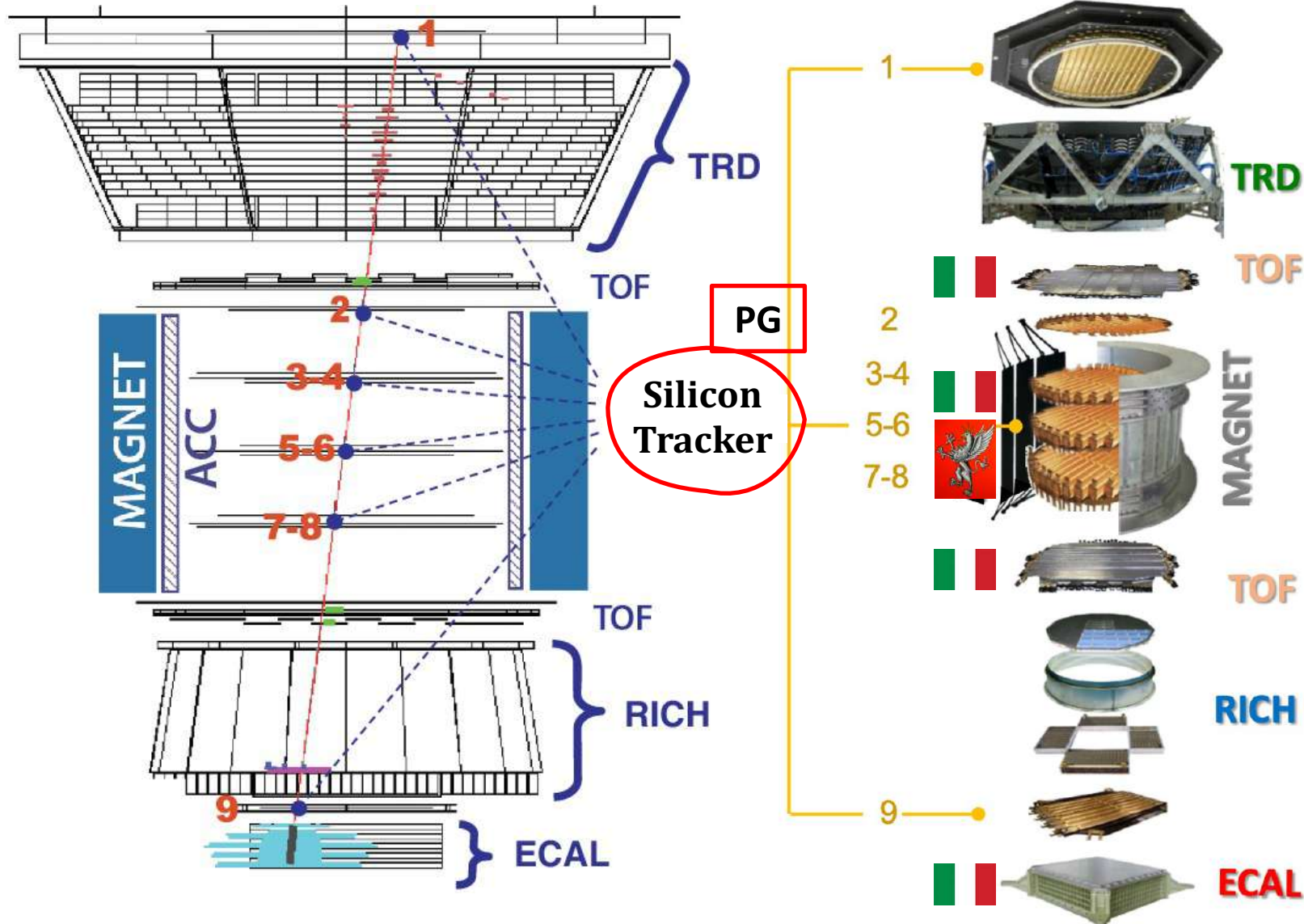




**L'esperimento AMS-02**



# L'esperimento AMS-02



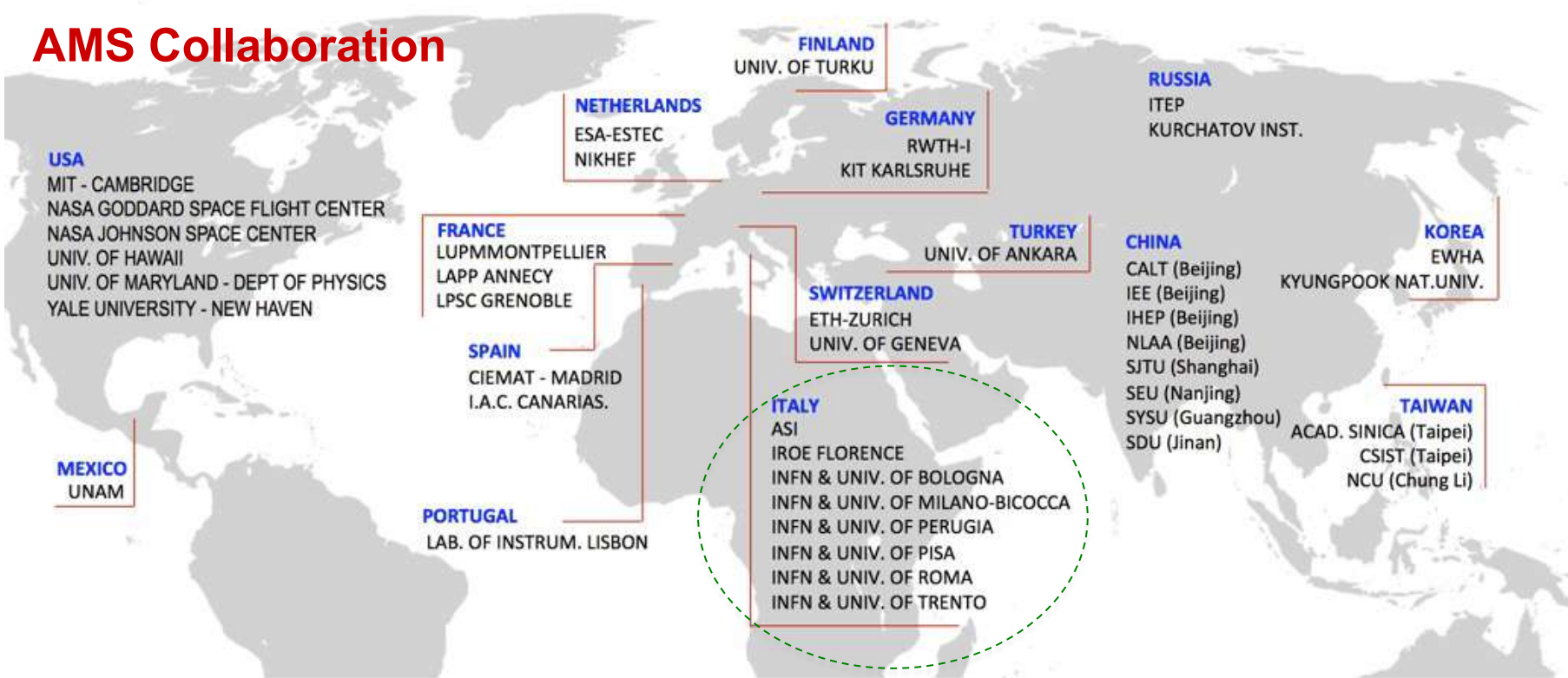
# L'esperimento AMS-02



- **Fisica fondamentale** – ricerca di antimateria primordiale e di materia oscura.
- **Astrofisica dei raggi cosmici** – accelerazione, trasporto e interazioni di particelle
- **Eliofisica e space weather** – radiazione nello spazio circumterrestre e interplanetario.

*AMS collaboration: 16 countries, 60 institutes, 500+ physicists, 20 years*

## AMS Collaboration





AMS has collected

196,575,054,699

cosmic ray events

Last update: January 11, 2022, 12:42 AM



# Risultati di AMS-02

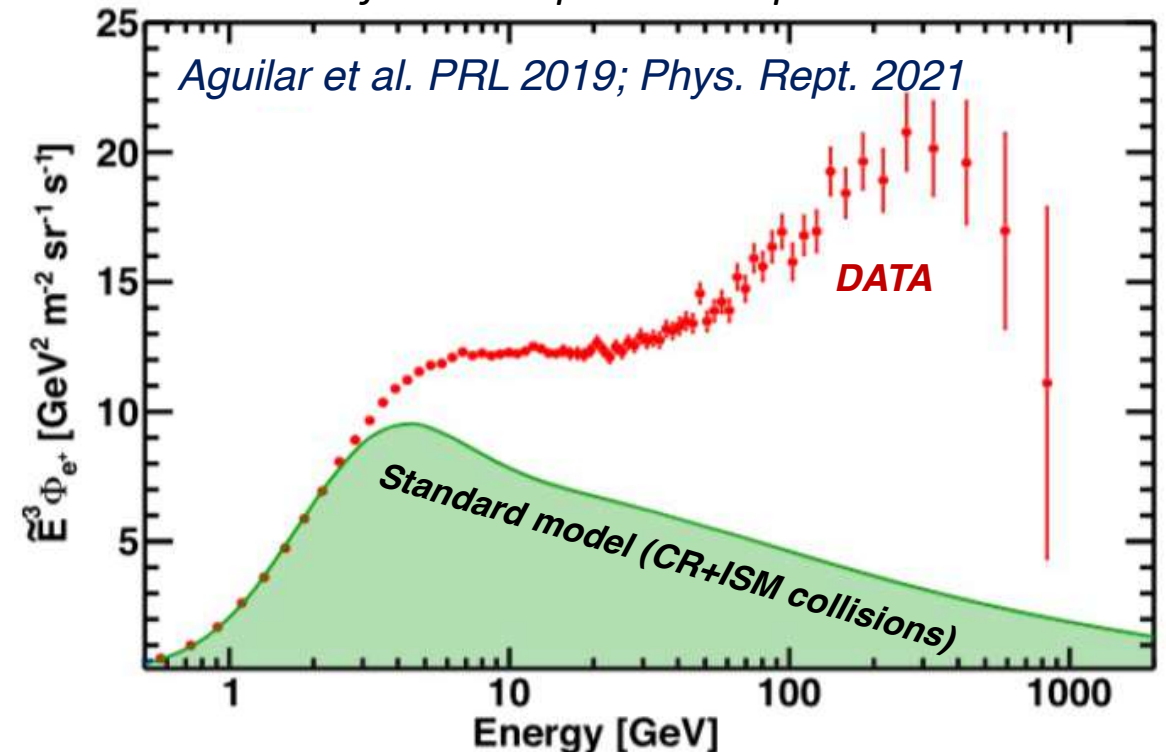


[Phys. Rev. Lett. 127, 271102 \(2021\)](#), Proton vs time daily 2021  
[Phys. Rev. Lett. 127, 021101 \(2021\)](#), Na-Al-N nuclei, 2021  
[Phys. Rev. Lett. 126, 081102 \(2021\)](#), Fluorine, 2021  
[Phys. Rep. 894, 1 \(2021\)](#), Physics Report 2021  
[Phys. Rev. Lett. 126, 041104 \(2021\)](#), Iron, 2021  
[Phys. Rev. Lett. 124, 211102 \(2020\)](#), Ne-Mg-Si nuclei, 2021  
[Phys. Rev. Lett. 123, 181102 \(2019\)](#), Helium isotopes 2019  
[Phys. Rev. Lett. 122, 101101 \(2019\)](#), Electrons 2019  
[Phys. Rev. Lett. 122, 041102 \(2019\)](#), Positrons 2019  
[Phys. Rev. Lett. 121, 051103 \(2018\)](#), Nitrogen 2018  
[Phys. Rev. Lett. 121, 051102 \(2018\)](#), electron/positron vs time 2018  
[Phys. Rev. Lett. 121, 051101 \(2018\)](#), proton/helium vs time 2018  
[Phys. Rev. Lett. 120, 021101 \(2018\)](#), Li-Be-B nuclei 2018  
[Phys. Rev. Lett. 119, 251101 \(2017\)](#), He-C-O nuclei 2017  
[Phys. Rev. Lett. 117, 231102 \(2016\)](#), B/C nuclei 2016  
[Phys. Rev. Lett. 117, 091103 \(2016\)](#), Antiprotons 2016  
[Phys. Rev. Lett. 115, 211101 \(2015\)](#), Helium 2015  
[Phys. Rev. Lett. 114, 171103 \(2015\)](#), Proton 2015  
[Phys. Rev. Lett. 113, 221102 \(2014\)](#), electron+positron 2014  
[Phys. Rev. Lett. 113, 121102 \(2014\)](#), electron and positrons 2014  
[Phys. Rev. Lett. 113, 121101 \(2014\)](#), positron fraction  
[Phys. Rev. Lett. 110, 141102 \(2013\)](#), positron fraction 2013

Citations/N papers: 5412/23=235

- Ricerca di nuova fisica
- Astrofisica dei Raggi Cosmici
- Elio fisica & Space Weather

*Misura del flusso dei positroni e predizione standard*



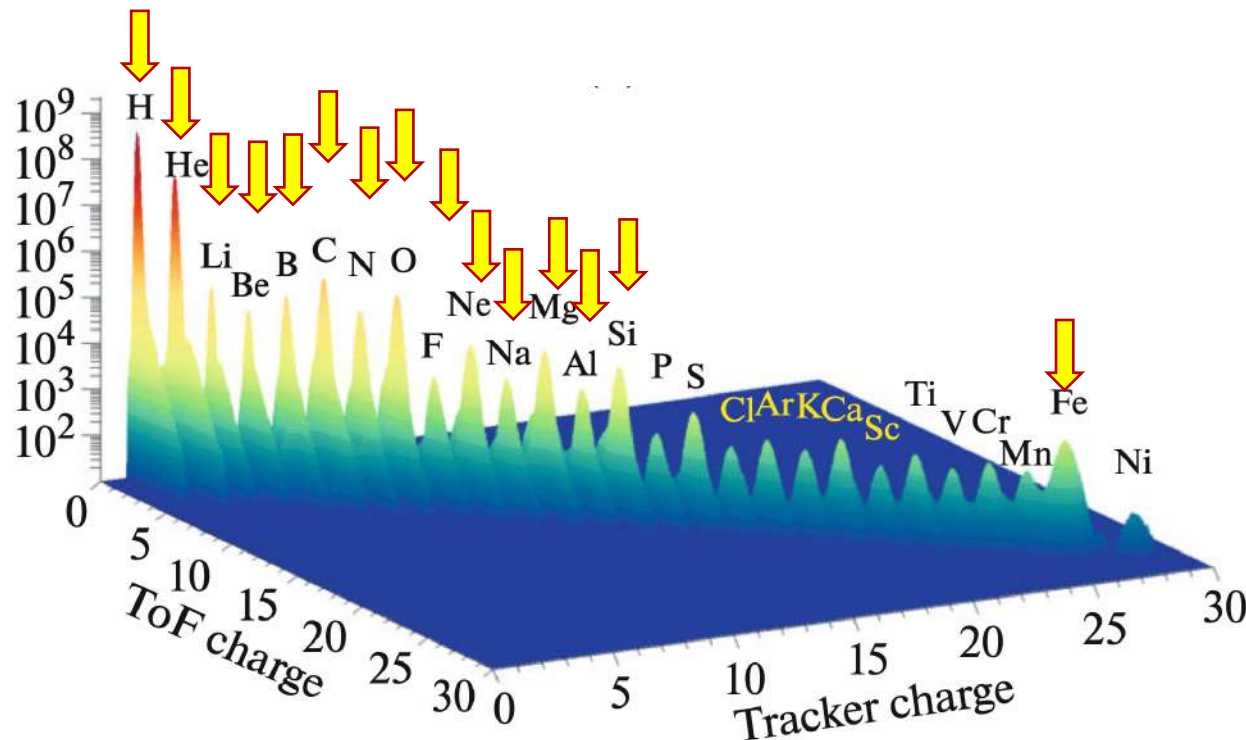


# Risultati di AMS-02

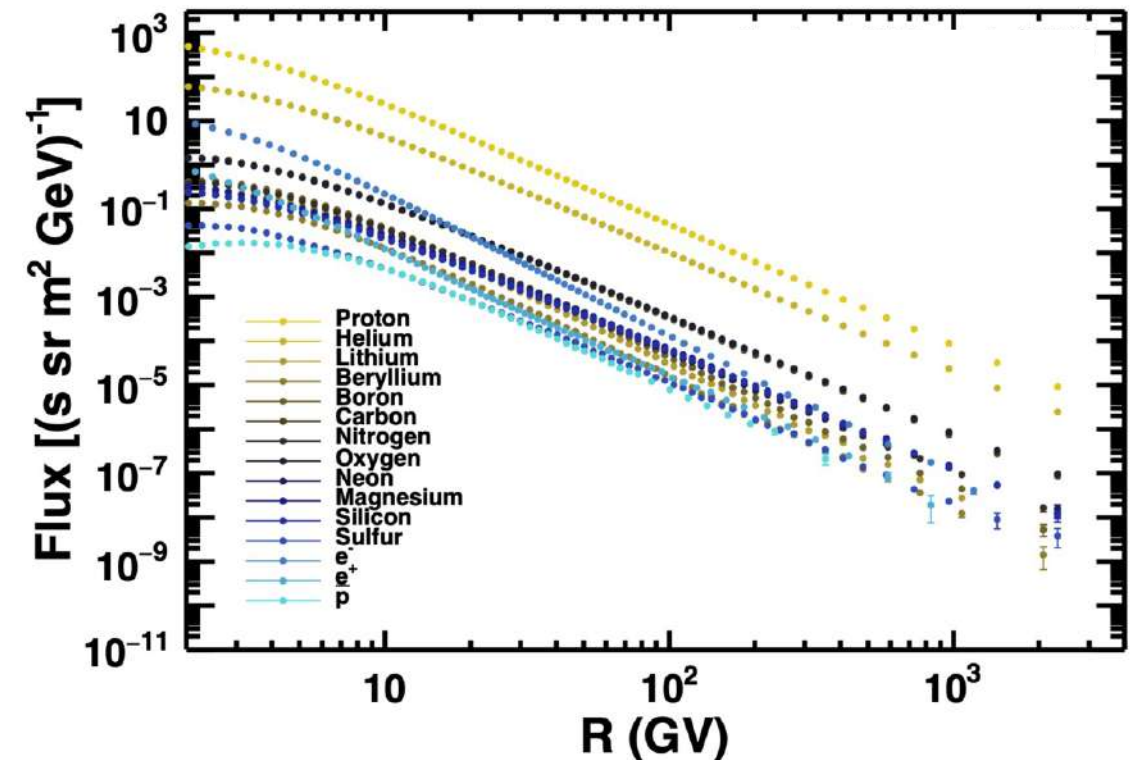


- Eccesso anomalo di **positroni**, la cui origine è ancora inspiegata.
- Tensione e possibile eccesso nel flusso degli **antiprotoni** ad alta energia
- Molteplici misure e trend inaspettati negli spettri delle componenti **nucleari**
- Nuove misure nel programma di fisica **eliosferica e spaziale**.

*Elementi identificati dai sistemi ToF-Tracker*



*Spettri di energia di varie componenti dei RC*

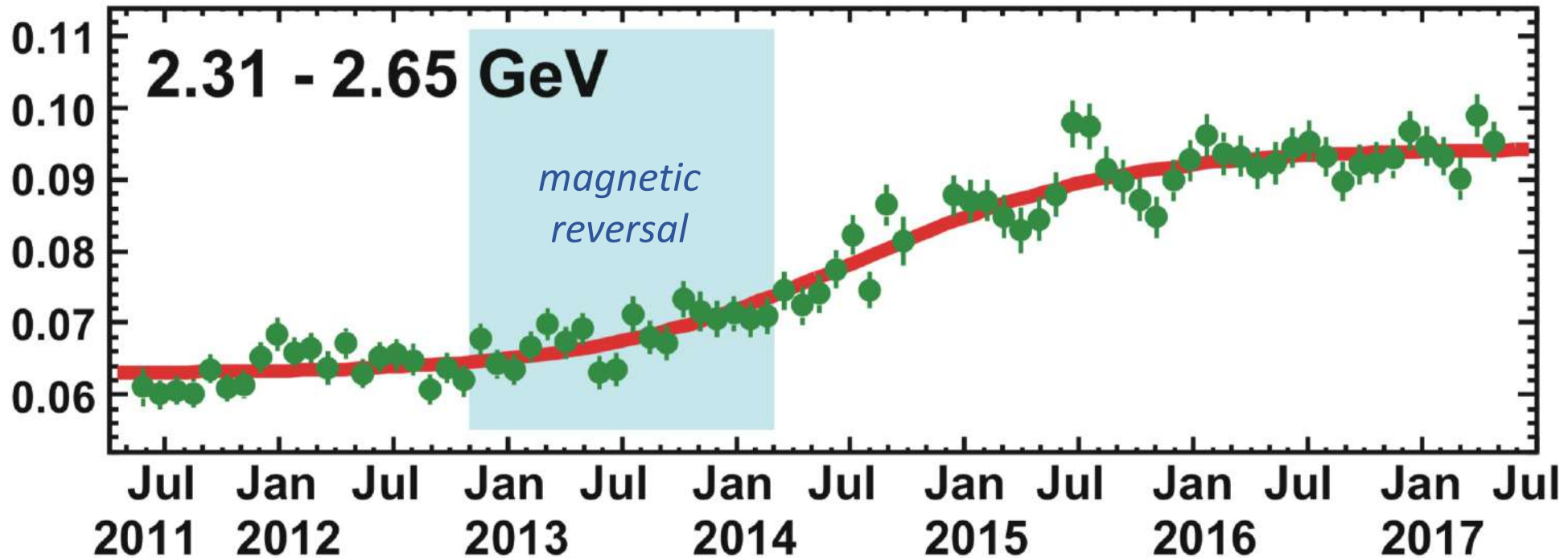


# Risultati di AMS-02



- Eccesso anomalo di **positroni**, la cui origine è ancora inspiegata.
- Tensione e possibile eccesso nel flusso degli **antiprotoni** ad alta energia
- Molteplici misure e trend inaspettati negli spettri delle componenti **nucleari**
- Nuove misure nel programma di fisica **eliosferica e spaziale**.

*Evoluzione del rapporto positroni/elettroni nei raggi cosmici [M. Graziani]*

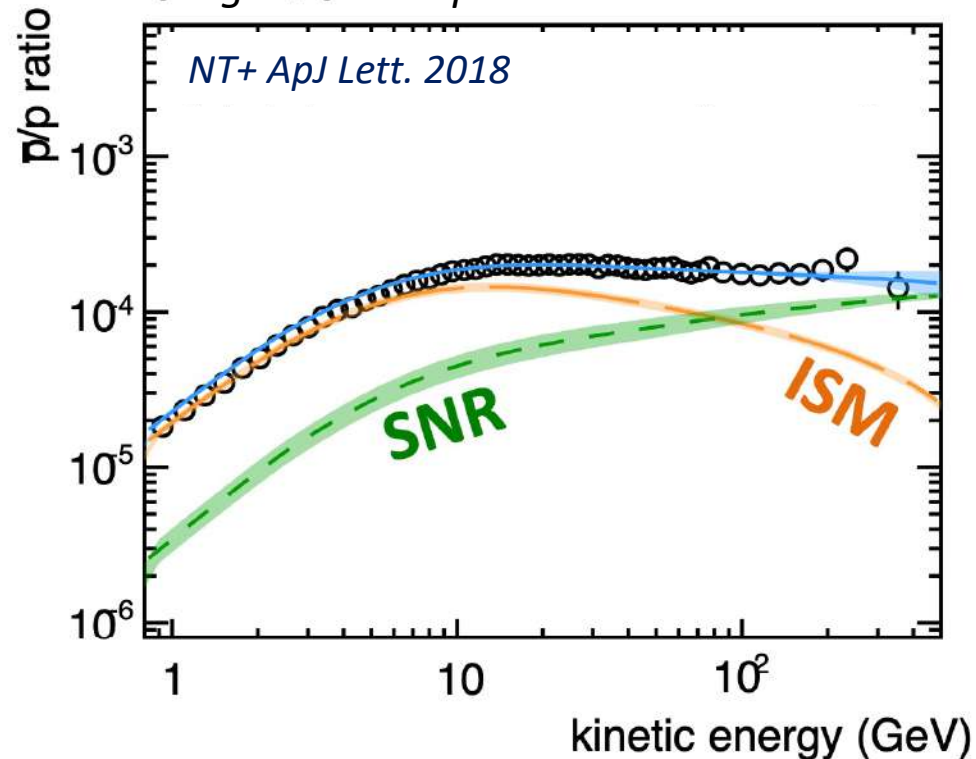




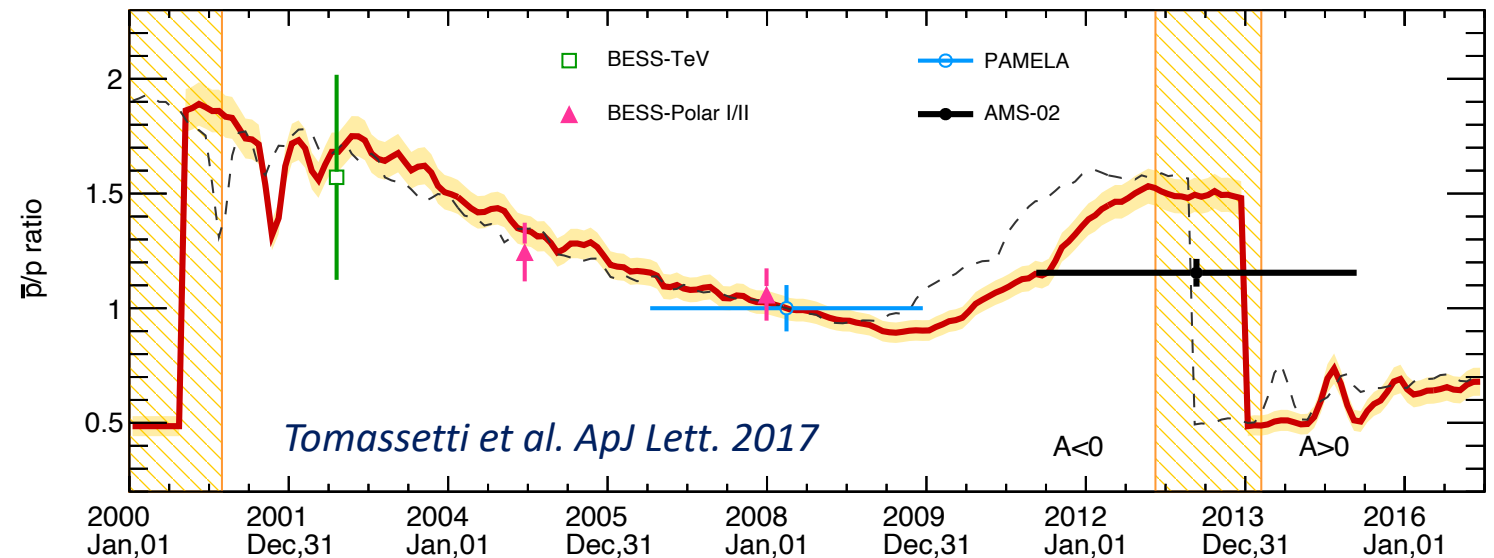
# Analisi e modelli: interazioni, trasporto, antimateria

- Produzione di **antinuclei** nei raggi cosmici galattici ( $\bar{p}$ ,  $\bar{d}$ ,  $\overline{He}$ ).
- **Collisioni** di nuclei nel mezzo interstellare e frammentazione
- Trasporto di (anti)particelle nell'eliosfera e **modulazione solare**.

Sorgenti di antiprotoni nei RC



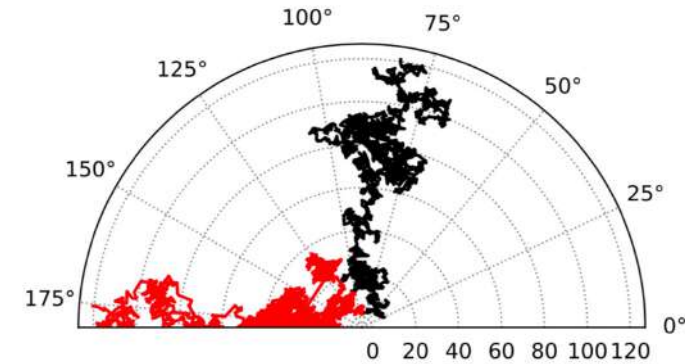
Predizione dell'evoluzione del rapporto antiprotoni/protoni



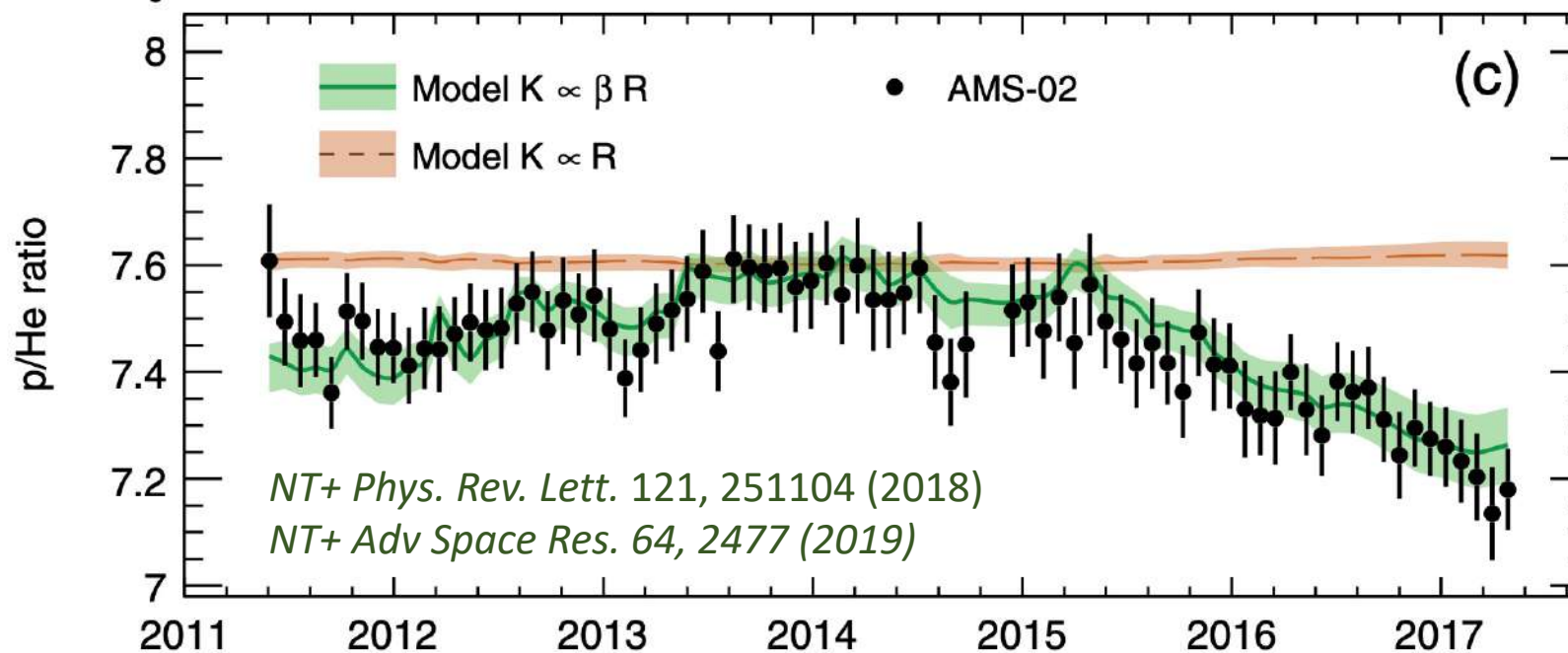
# Analisi e modelli: interazioni, trasporto, antimateria

- Produzione di **antinuclei** nei raggi cosmici galattici ( $\bar{p}$ ,  $\bar{d}$ ,  $\overline{He}$ ).
- **Collisioni** di nuclei nel mezzo interstellare e frammentazione
- Trasporto di (anti)particelle nell'eliosfera e **modulazione solare**.

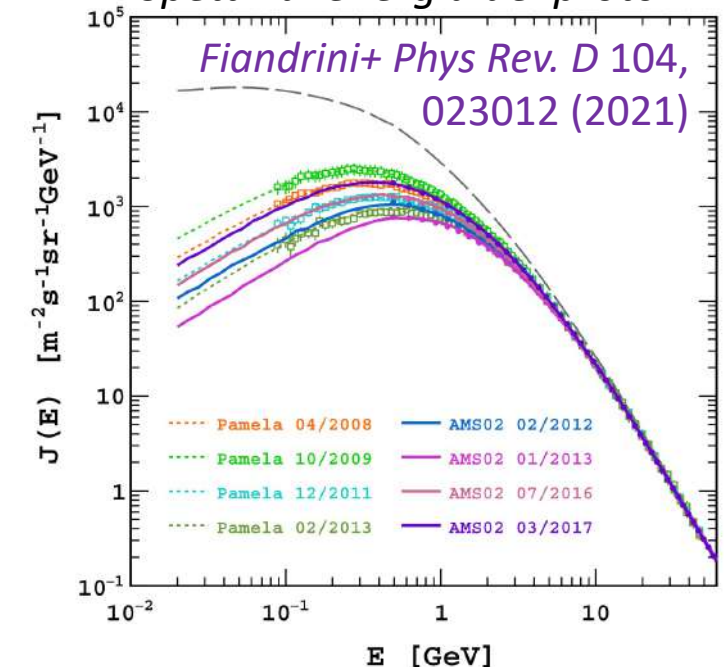
Simulazione di traiettorie



Soluzione all'anomalia di AMS nel rapporto p/He



Spettri di energia dei protoni



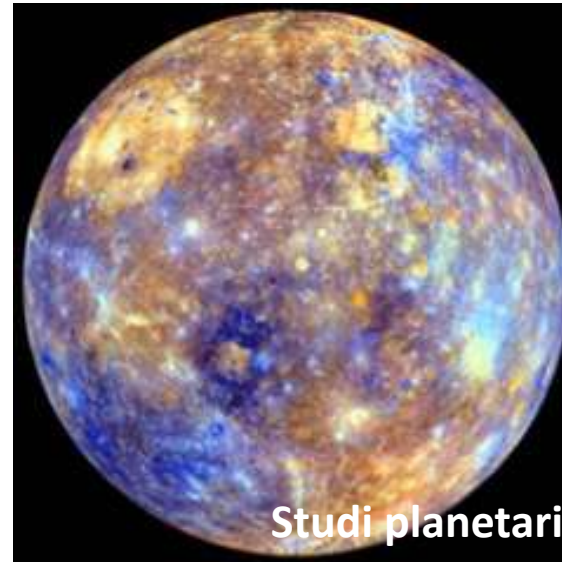
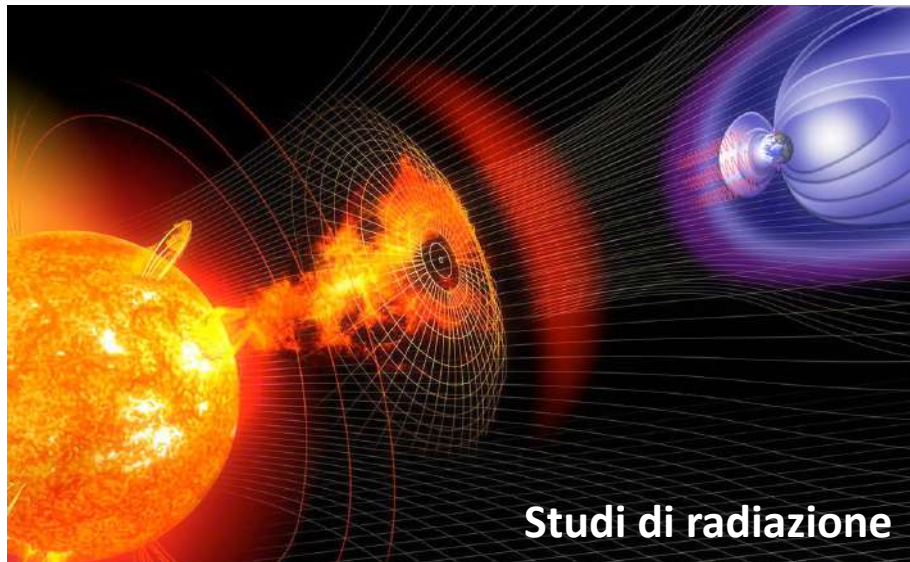


# Analisi e modelli: Elio fisica e space weather

Accordo ASI-UNIPG 2019-2-HH.0 a lungo termine per attività di ricerca e sviluppo di competenze innovative in ambito spazio [2019-2034]

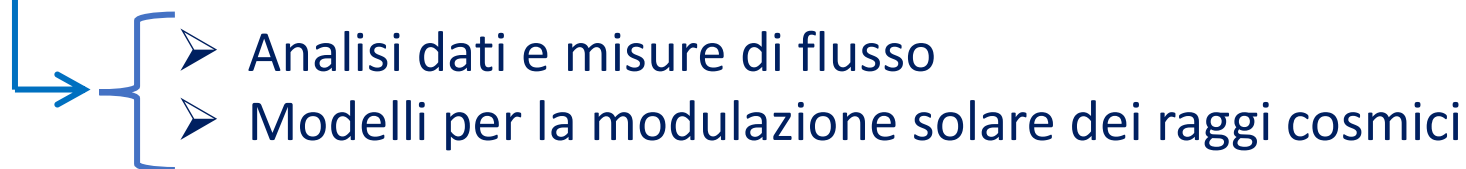
- ✓ **Studi di radiazione:** misure e modelli per l'ambiente di radiazione nello spazio.
- ✓ **Geologia planetaria** – studio processi fisico-chimici, analisi spettrale e catalogazione.
- ✓ **Programma nanosatelliti** – missione cubesat per esperimenti in orbita [Dip. Ingegneria].

Vasto programma di ricerca multidisciplinare, applicazioni, sviluppi tecnologici, attività di outreach



Accordo ASI-UNIPG 2019-2-HH.0 a lungo termine per attività di ricerca e sviluppo di competenze innovative in ambito spazio [2019-2034]

- ✓ **Studi di radiazione:** misure e modelli per l'ambiente di radiazione nello spazio.
- ✓ **Geologia planetaria** – studio processi fisico-chimici, analisi spettrale e catalogazione.
- ✓ **Programma nanosatelliti** – missione cubesat per esperimenti in orbita [Dip. Ingegneria].



## DRIFT: Cosmic antimatter drifting through the Solar Wind

>> Fondo ricerca di base. Studio del trasporto dell'antimateria nell'eliosfera [2020-2022]

## CAESAR: Comprehensive spAce wEather Studies for ASPIS prototype Realization

>> Proposta progettuale vincitrice del Bando ASI-INAF [<http://aspis.iaps.inaf.it>]

>> Network di 77 ricercatori da 10 istituzioni italiane (UniPG, INAF, INFN, ASI, ... )

>> Goal: creazione e popolamento di ASPIS, centro scientifico ASI per lo Space Weather [2022-24]





# Il progetto PAN – Penetrating particle Analyzer

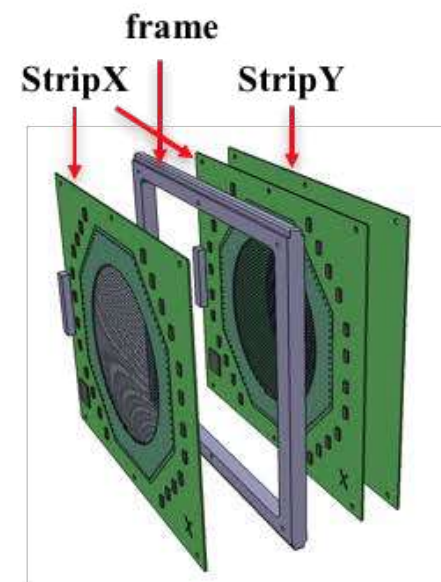
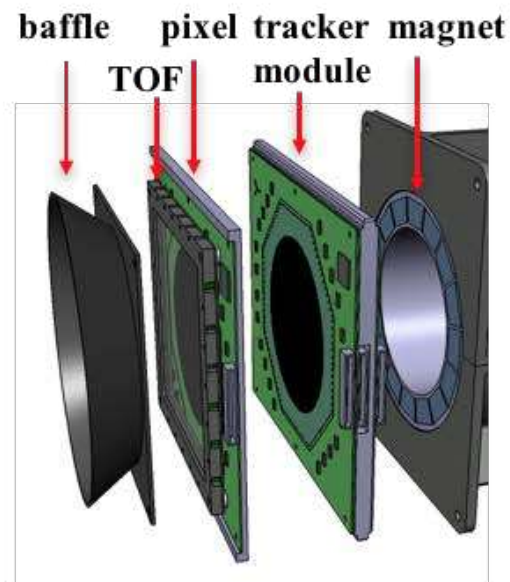
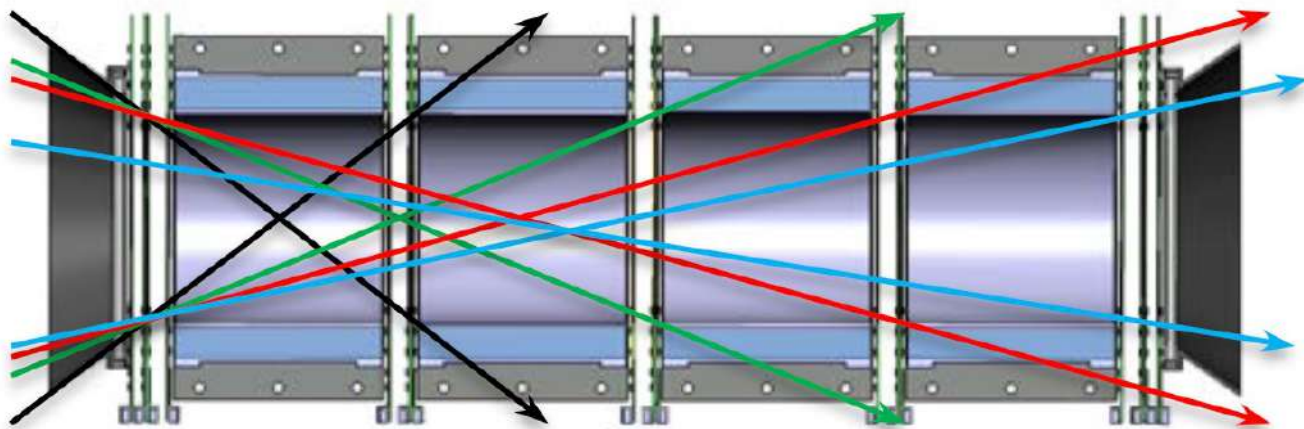


analizzatore spettrometro compatto e modulare per misure di bassa energia

- ❑ INFN & UniPG + Università Tecnica di Praga + Università di Ginevra
- ❑ Strumentazione di bordo in missione di esplorazione spaziale long-term
- ❑ Studio di eventi solari violenti, raggi cosmici e meteorologia spaziale
- ❑ Misure di nuclei, leptoni, antimateria a 50 MeV – 20 GeV. Long-duration missions >> yrs

Sviluppo dimostratore "Mini-PAN" (2020-23) progetto EU H2020 FET\_OPEN GA 862044

White paper: Wu et al. Adv Space Res. 63 (2019)

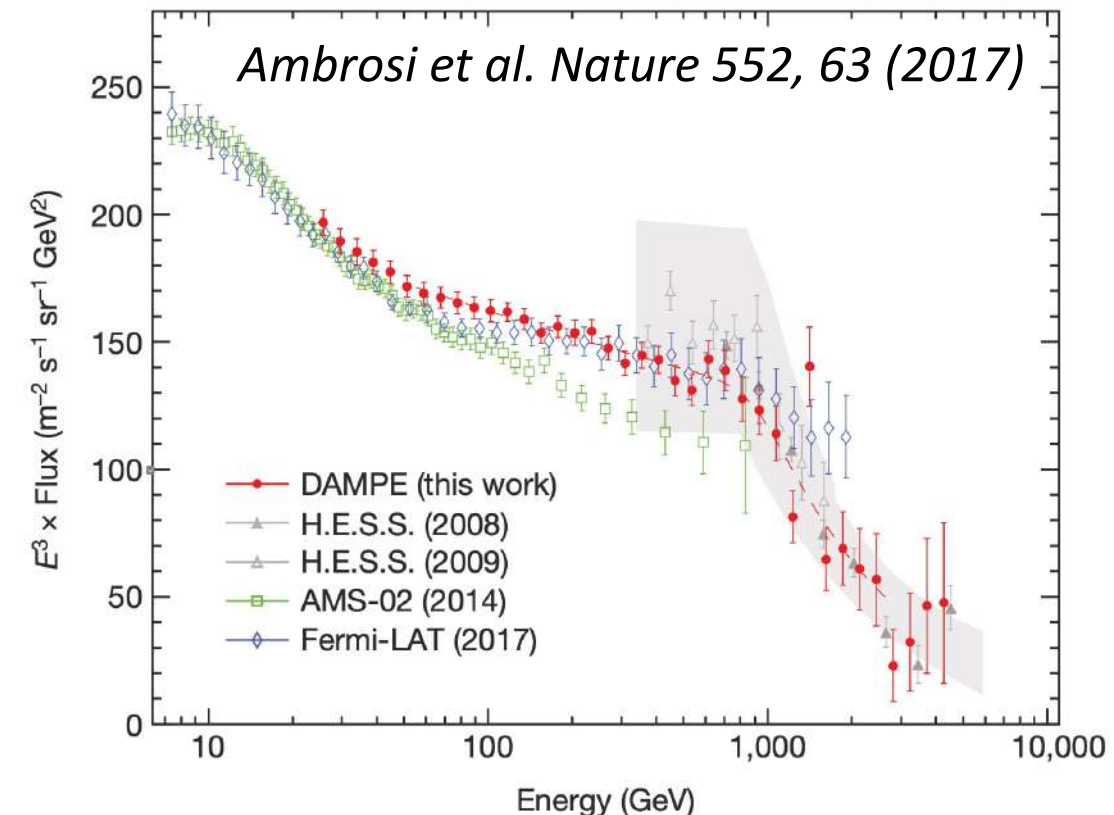
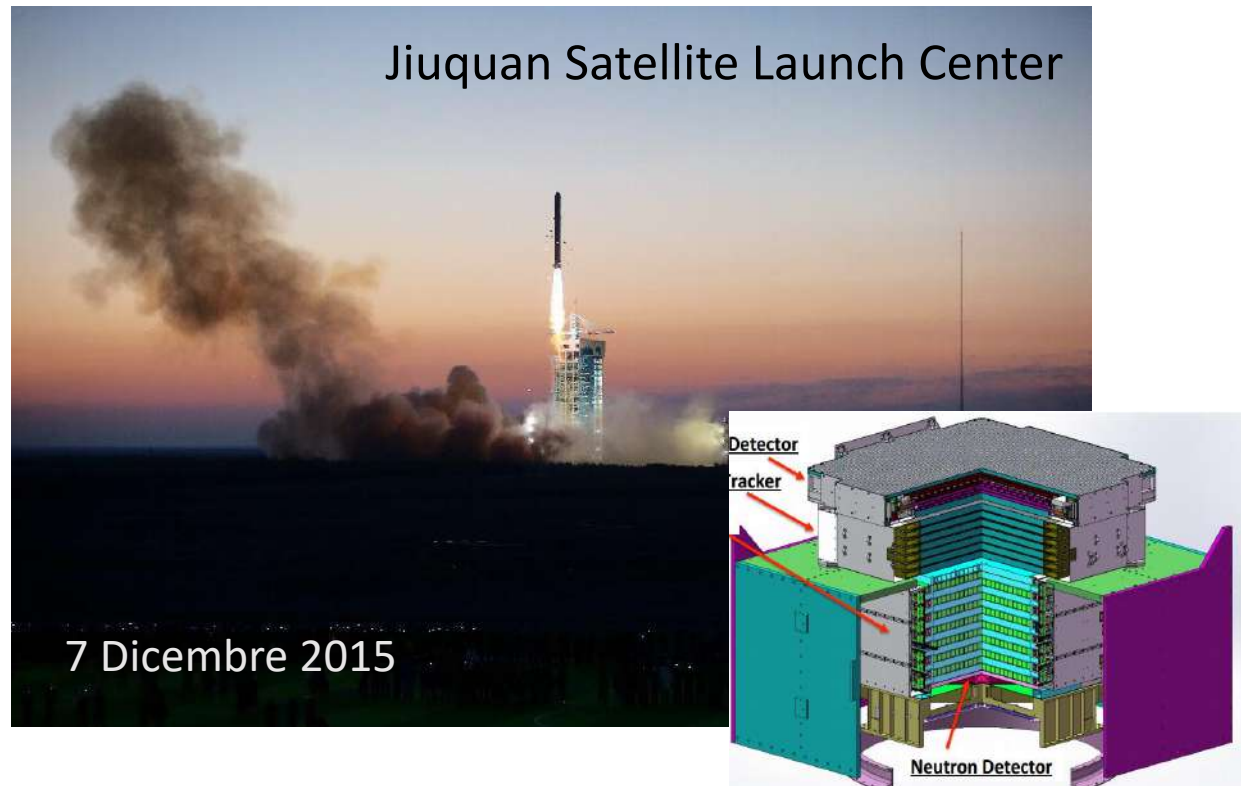


# La missione DAMPE – Dark Matter Particle Explorer



- Chinese Academy of Sciences + INFN PG-BA-LE + Università di Ginevra
- Orbita su satellite a 500 km da dicembre 2015 => fino ad almeno 2024
- PG: Tracker e test di qualifica spaziale

➔ Direct detection of a break in the TeV CR spectrum of  $e^+ + e^-$

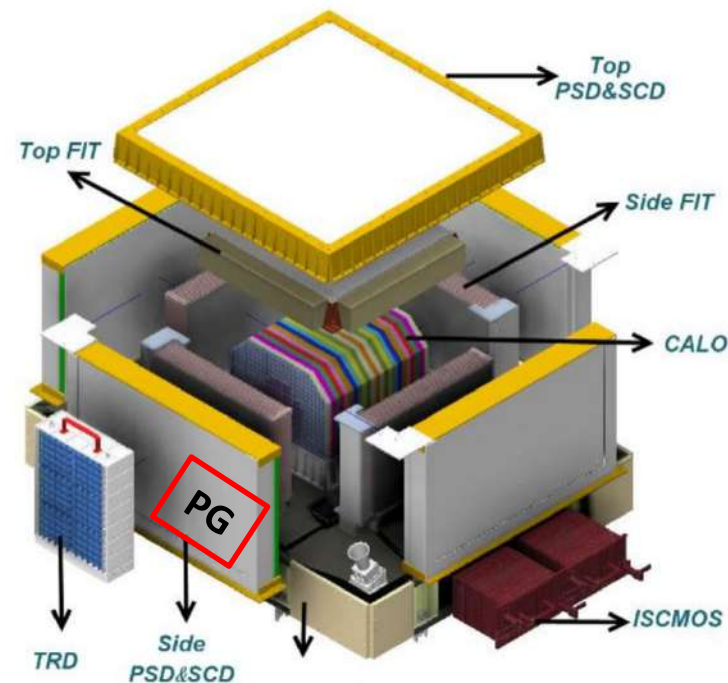




# L'esperimento HERD sulla Stazione Spaziale Cinese

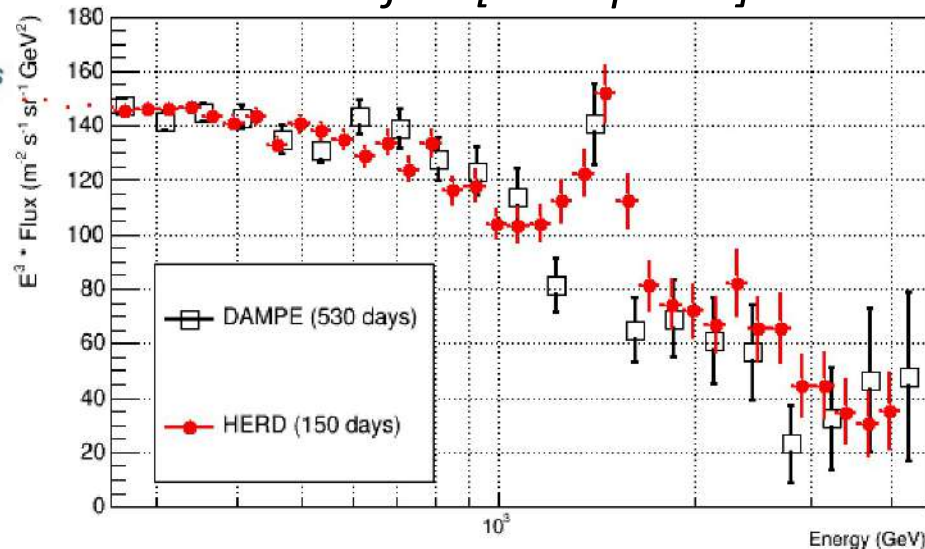


## The High Energy cosmic Radiation Detection facility

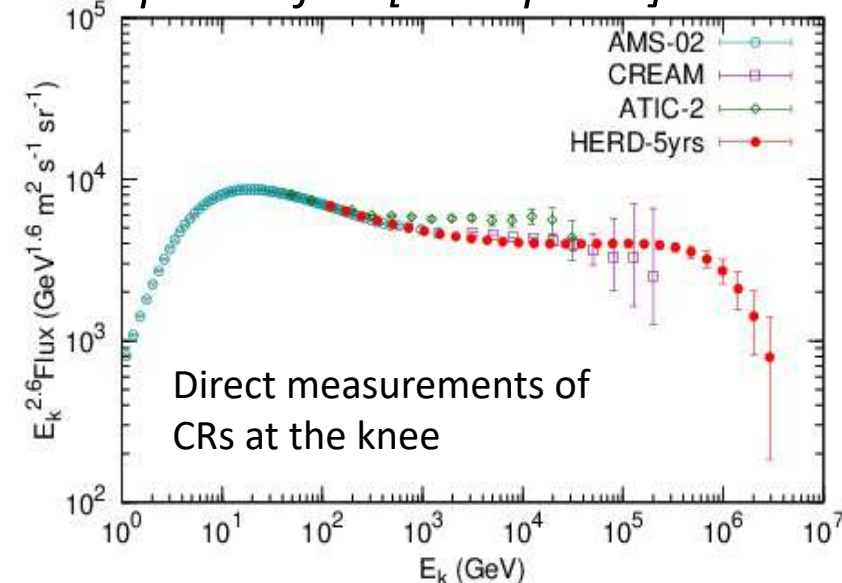


- HERD consortium: China + Svizzera + Spagna + Italia (INFN PG)
- Missione long-term  $\sim 10$  yrs (Exp  $\sim 20 \text{ m}^2 \text{ sr yrs}$ ), NET 2027.
- Misure calorimetriche di leptoni (multi-TeV) e nuclei (PeV!)

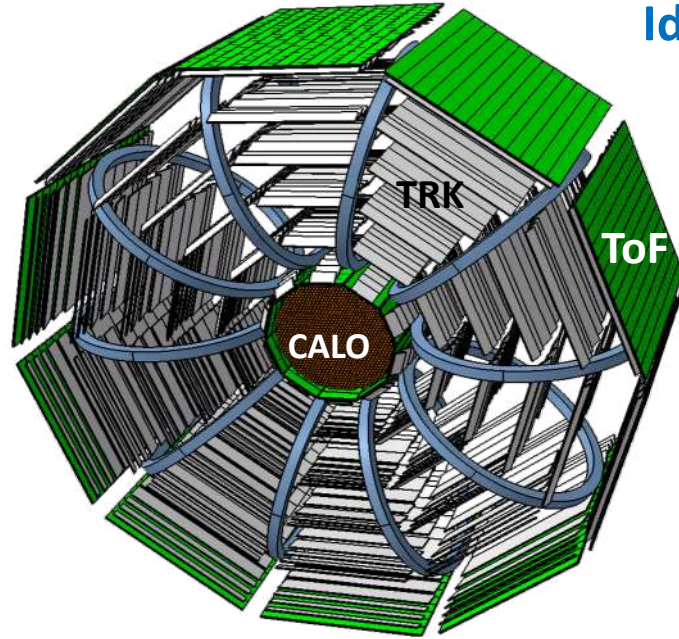
*all-electron flux [anticipated]*



*proton flux [anticipated]*



# ALADInO: A Large Antimatter Detector In Orbit



Idea per uno spettrometro di futura generazione per rivelazione di antimateria ad energie multi-TeV in missioni long-term in L2

Core team members: IT, FR, DE, SE, CZ, CH

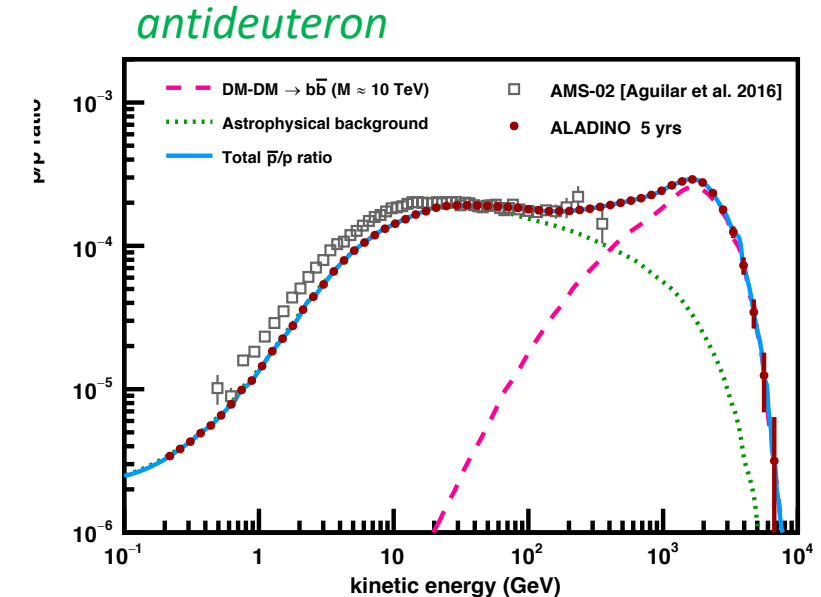
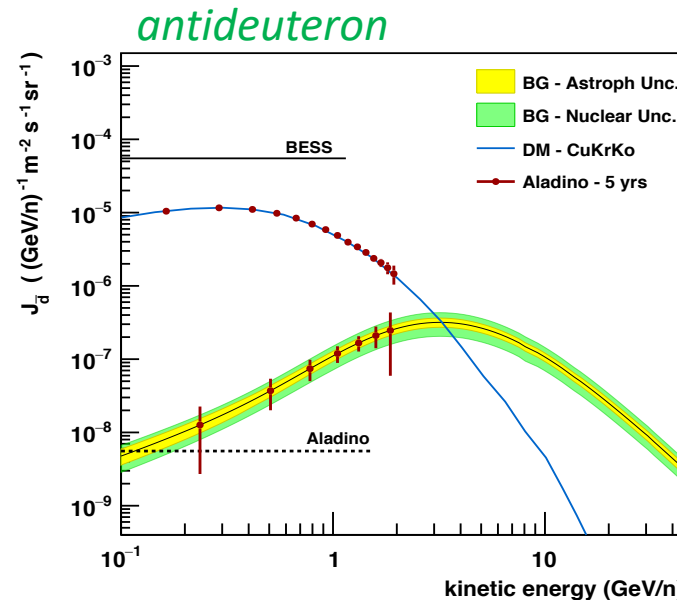
Presentato a ESA call VOYAGE 2050 (2019)

High Precision Particle Astrophysics as a New Window on the Universe *with an Antimatter Large Acceptance Detector In Orbit (ALADInO)*, Exp. Astron. 19 (2021)

- Calorimetro 3D isotropo à la HERD circondato da tracciatore toroidale
- Magnete superconduttore ad alta temperatura con  $B = 0.8$  T.

Weight: 6 Tons  
Power: 4 kW  
# channels: 2.5 M

|                    |                      |
|--------------------|----------------------|
| Total acceptance   | 10 m <sup>2</sup> sr |
| MDR                | 20 TV                |
| Calo resolution e- | 2%                   |
| Calo resolution N  | 30%                  |
| TOF resolution     | 100 ps               |





# Astroparticelle nello Spazio: fisica fondamentale e applicazioni

