

Il nuovo rivelatore di particelle ad alta energia (HEPD-02) a bordo del satellite CSES-02

Zouleikha Sahnoun

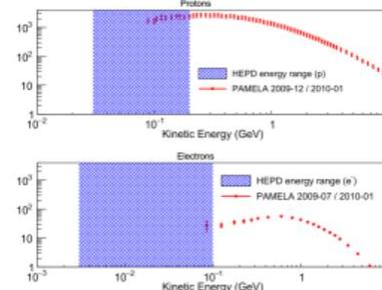
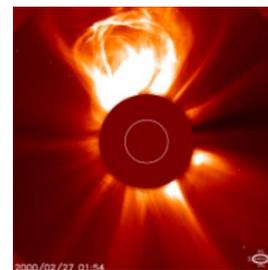
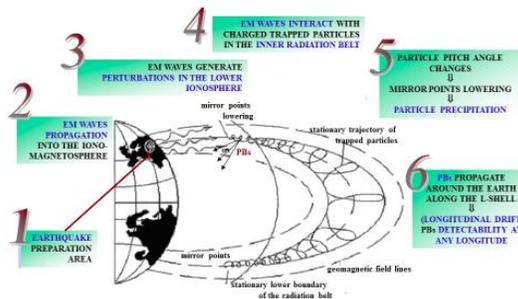
Università di Bologna e INFN Bologna

Le missioni spaziali CSES

CSES (China Seismo-Electromagnetic Satellite) è un programma spaziale Cinese - Italiano dedicato al monitoraggio dell'ambiente vicino alla terra.

Obiettivi scientifici:

- Analisi della ionosfera, magnetosfera e plasma vicino alla terra;
- Misura delle perturbazioni ionosferici e magnetosferici correlati ad eventi sismici di grande magnitudine;
- Misura del flusso di particelle cariche e la loro precipitazione dalle face di Van-Allen;
- Studio di eventi solari CMEs, SEPs, ...;
- **Misura dello spettro a bassa energia dei raggi cosmici galattici;**

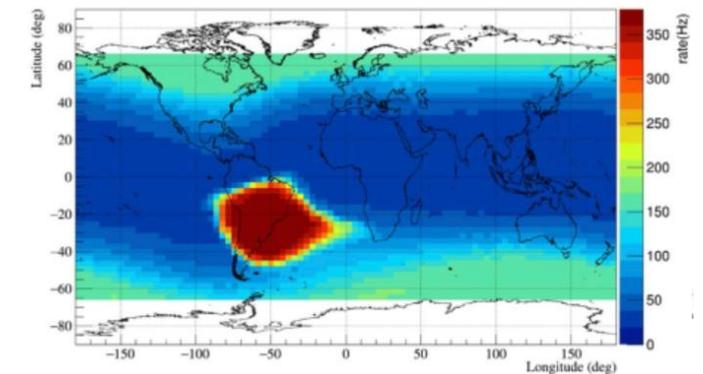
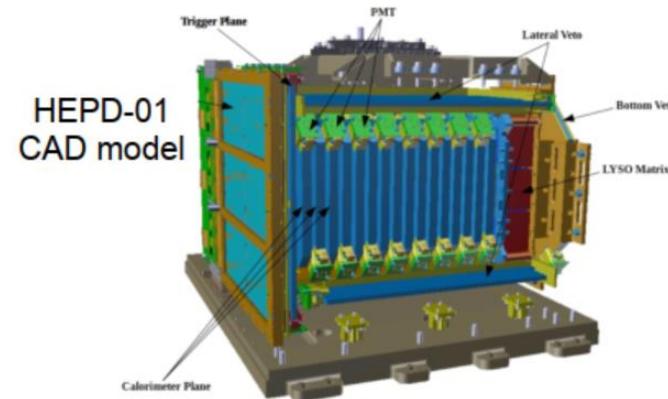
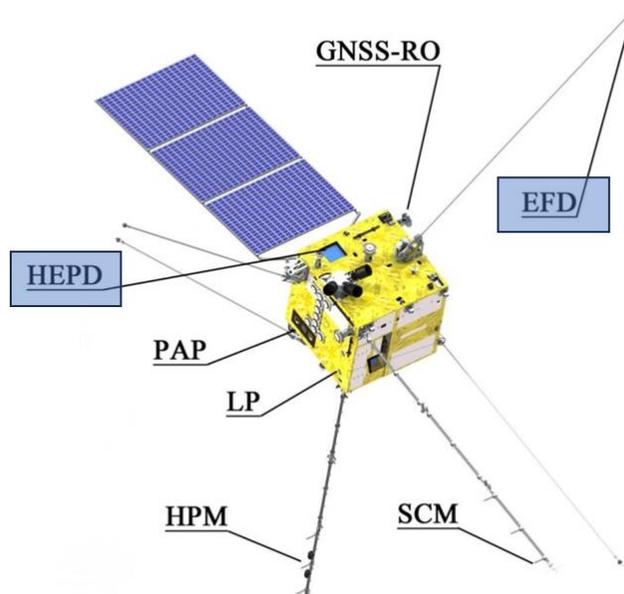


HEPD-01 a bordo di CSES-01

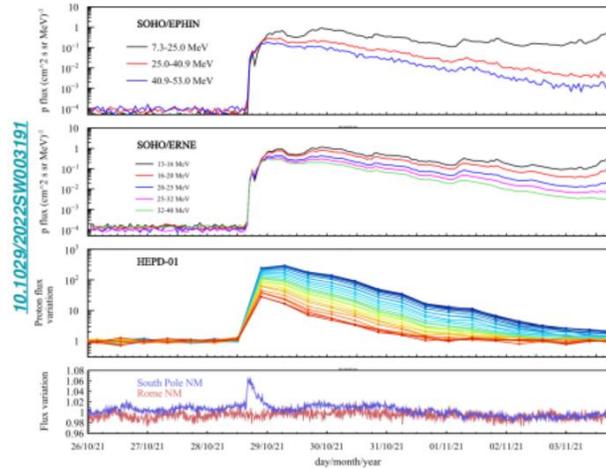
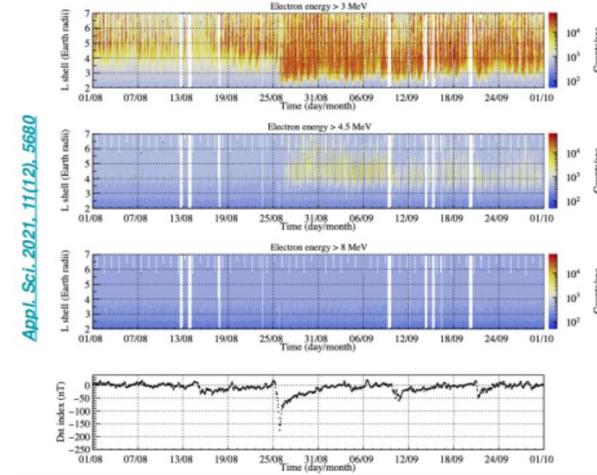
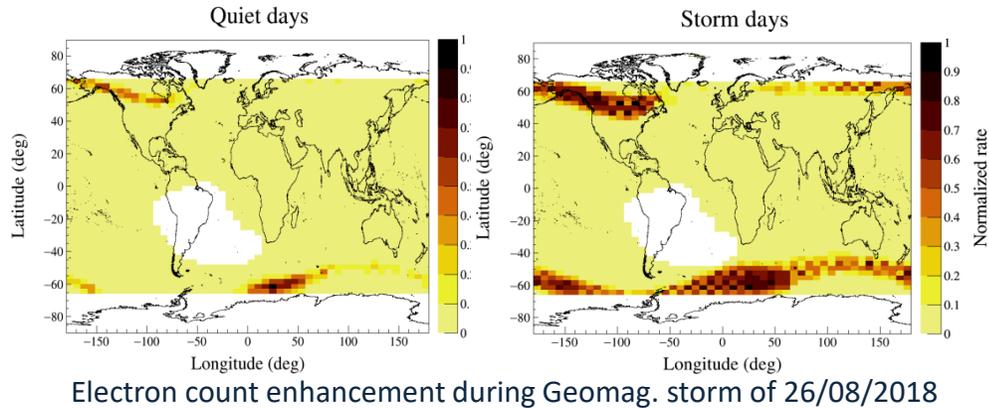
- CSES-01 è stato messo in orbita a Febbraio 2018.
 - Orbita eliosincrona, 507 km (LEO), puntando allo Zenith
 - 9 strumenti tra cui **HEPD-01** (High Energy Particle Detector) sviluppato dalla collaborazione Italiana **LIMADOU**.



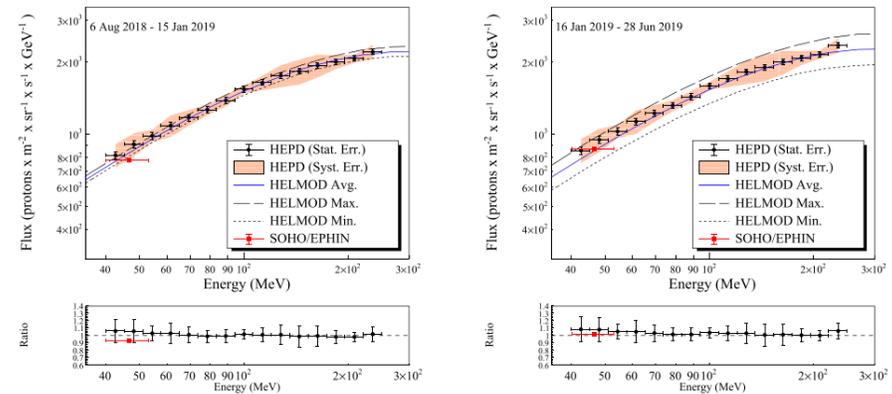
HEPD-01 a bordo di CSES-01



Risultati di HEPD-01



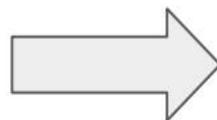
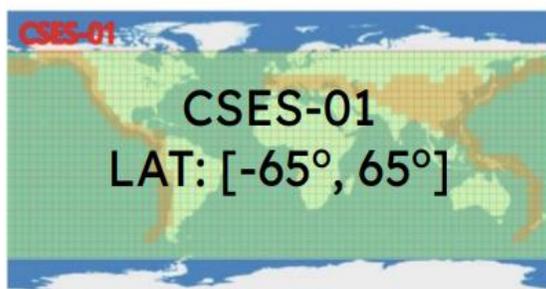
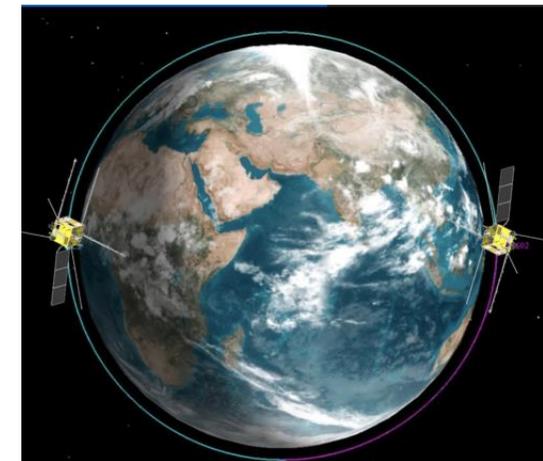
SEP ground level enhancement osservato nel 2021



Flusso di protoni galattici misurato nel range 40 – 250 MeV

HEPD-02 a bordo di CSES-02

- CSES-02 lancio aspettato a fine 2024.
 - Orbita eliosincrona, 500 km altitudine
 - Stesso piano orbitale di CSES-01, con una differenza di fase 180° → studio **multi-satellitare**
 - Complementarità dell'orbita con CSES-01

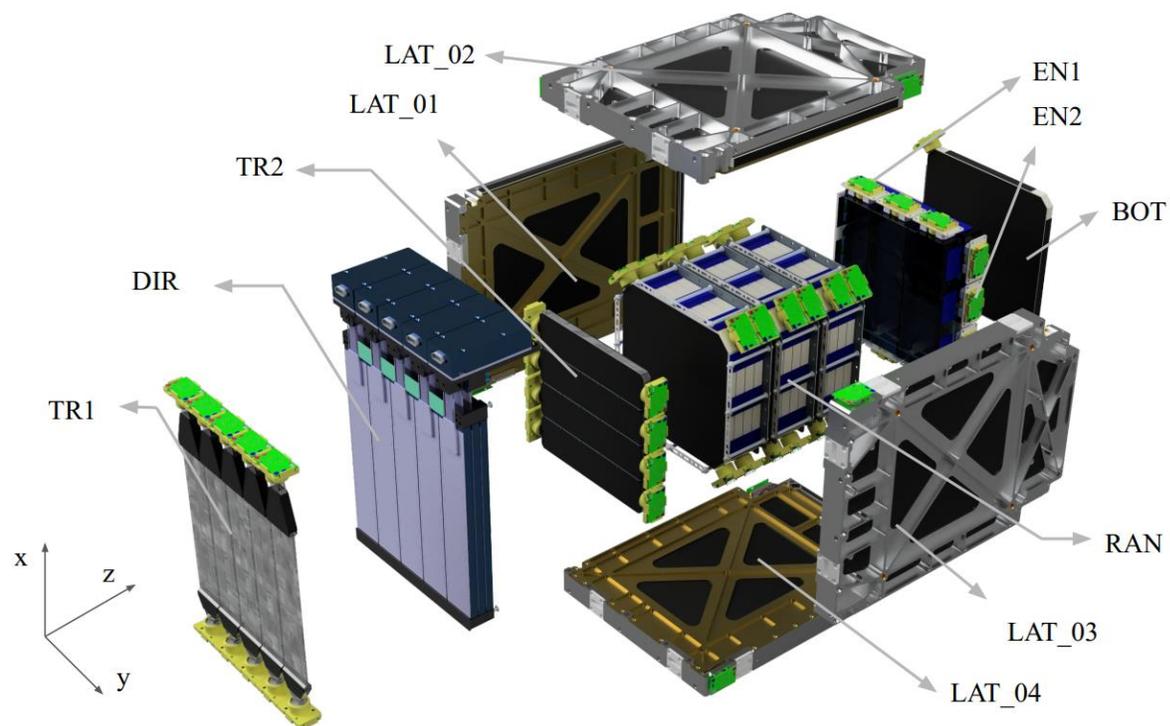


La collaborazione LIMADOU ha costruito 2 dei 11 strumenti a bordo di CSES-02: **HEPD-02** e **EFD-02** (Electric Field Detector).

Kin. energy range (electron)	3 MeV to 100 MeV
Kin. energy range (proton)	30 MeV to 200 MeV
Angular resolution	$\leq 10^\circ$ for $E_{kin} > 3$ MeV electrons
Energy resolution	$\leq 10\%$ for $E_{kin} > 5$ MeV electrons
Particle selection efficiency	> 90%
Detectable flux	up to 10^7 m ⁻² s ⁻¹ sr ⁻¹
Operating temperature	-10 °C to +35 °C
Operating pressure	$\leq 6.65 \cdot 10^{-3}$ Pa ("vacuum")
Mass budget	50 kg
Power Budget	45 W
Data budget	≤ 100 Gb/day

IL rivelatore di particelle ad alta energia HEPD-02

HEPD-02 è disegnato per rivelare elettroni, protoni ed ioni pesanti nel range di energie 3 - 100 MeV per elettroni, e 30 to 200 MeV/n per protoni e ioni.

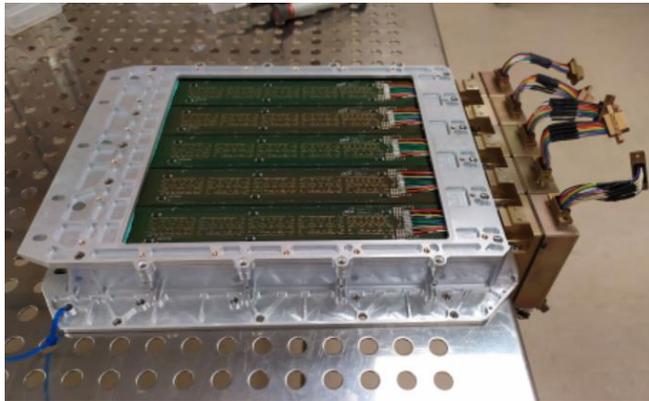


- Due piani di trigger **TR1** (2 mm di spessore) e **TR2** (8 mm), ortogonali, di scintillatori plastici EJ-200.
- Tracciatore (Direction detector) basato su 3 layers di Monolithic Active Pixels.
- Calorimetro (Energy detector) :
 - Torre di **12** scintillatori plastici (**RAN**), $150 \times 150 \times 10 \text{ mm}^3$
 - Due piani ortogonali di cristalli di LYSO:CE $50 \times 150 \times 25 \text{ mm}^3$ (**EN**)
- Cinque pannelli di contenimento (**CD**) plastici.

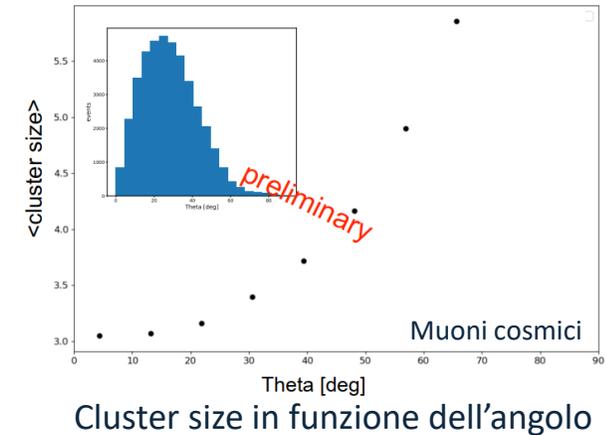
Design innovativo

Primo uso nello spazio:

- **ACTIVE MONOLITHIC PIXEL SENSORS** basato sui MAPS sviluppati per ALICE al CERN
- **Cristalli LYSO:CE di grandi dimensioni** ($50 \times 150 \times 25 \text{ mm}^3$)



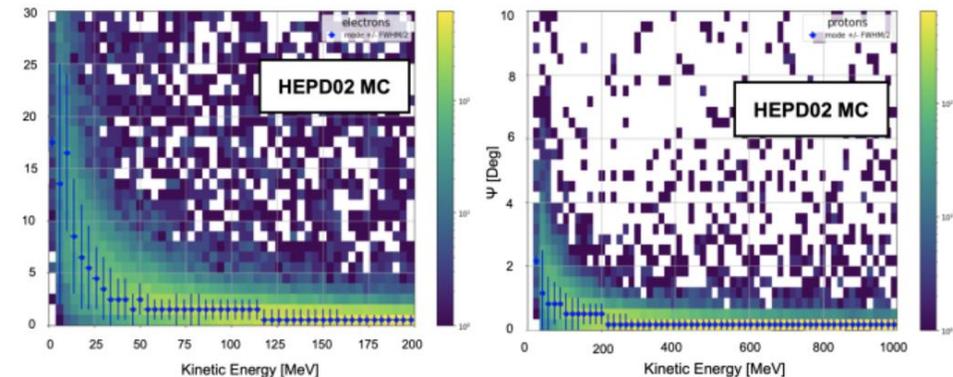
Tracciatore: basato su 5 moduli indipendenti con 3 strati (stave):
 ALTAI: 512x1024 pixels
 Pixels $29.24 \mu\text{m} \times 26.88 \mu\text{m}$ ($\sim 4 \mu\text{m}$ di risoluzione)
 Basso material budget $0.015 X_0$



(courtesy F.Follega,
ASAPP 2023)

Risoluzione angolare per elettroni e protoni è dipendente dell'energia :

- $\sim 10^\circ$ per elettroni di bassa energia,
- $\sim 1^\circ$ per protoni di bassa energia.



Risoluzione angolare vs energia (MC)

Design innovativo

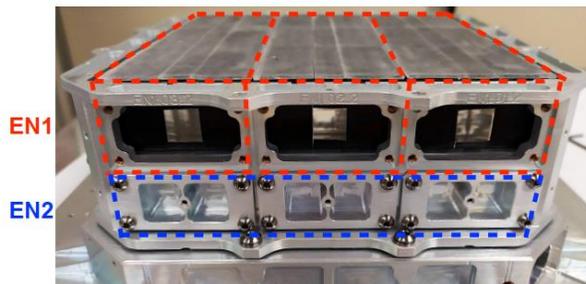
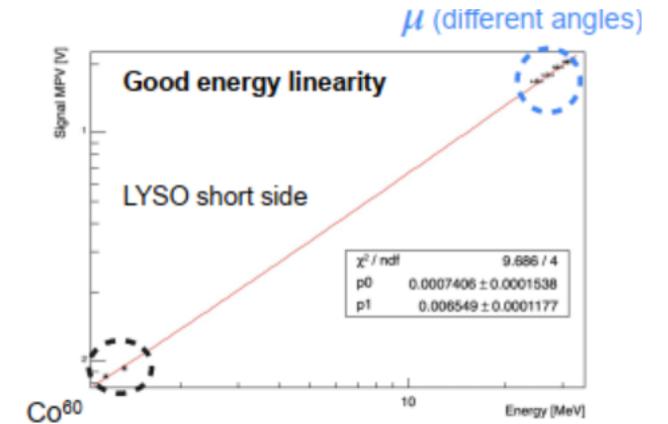
Primo uso nello spazio:

- **ACTIVE MONOLITHIC PIXEL SENSORS** basato sui MAPS sviluppati per ALICE al CERN
- **Cristalli LYSO:CE di grandi dimensioni** ($50 \times 150 \times 25 \text{ mm}^3$)



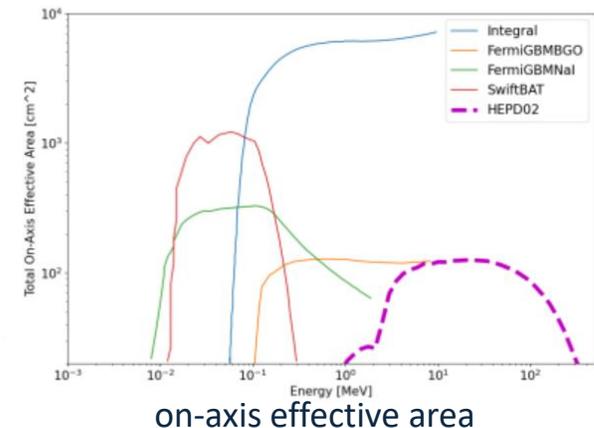
- Decay time corto
- Alta densità
- Resa di luce molto alta

Density [g/cm^3]	7.1
Attenuation length for 511 keV (cm)	1.2
Decay time [ns]	36
Energy resolution @ 662 keV	8.0
Light output, photons per keV	33
Average temperature coefficient 25 to 50°C (%/°C)	-0.28



Sensibilità ai Gamma-Ray Bursts ad energie $> 2 \text{ MeV}$.

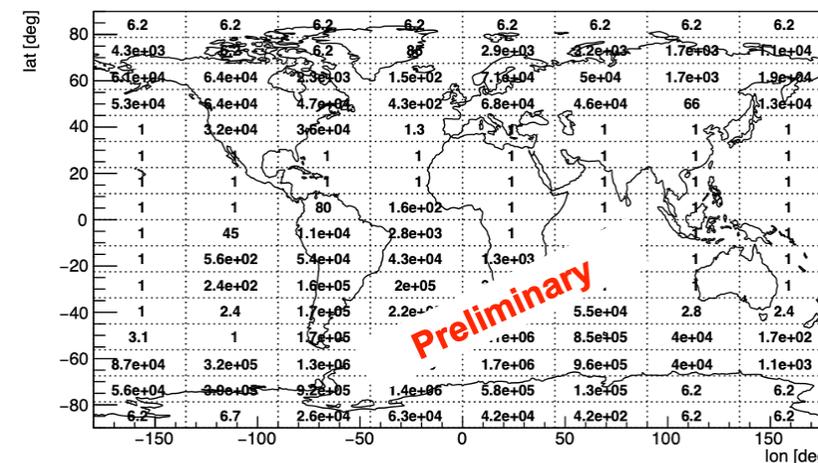
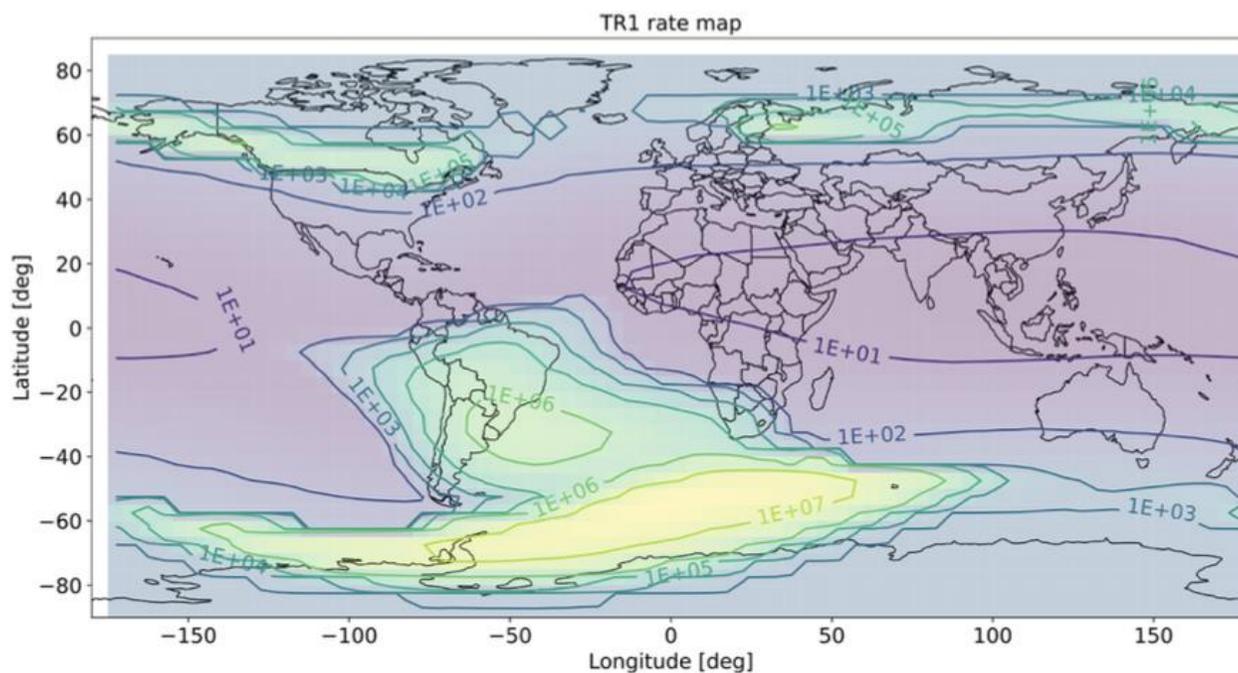
(courtesy F. Follega and A. Lega, ICRC 2023, 116 and 758)



Nuova logica di trigger

A secondo della zona l'orbitale diverse maschere di trigger possono essere usati in contemporaneo.

- Max **6 maschere concorrenti**; (default TR1&TR2)
- 4 maschere di trigger possono essere **pre-scalati**;



Rate sharing scheme

HEPD-02 acquisition rate allowed by the satellite



Test sotto faccio

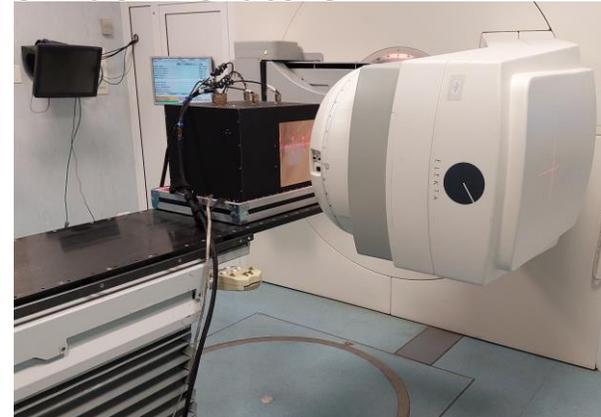
verifica delle prestazioni del rivelatore

Elettroni, 30-450 MeV @ BTF, Frascati (Italy)

Elettroni 6-12 MeV /gamma @ Medical LINAC, Ospedale S. Chiara, Trento (Italia)

Protoni, 20-230 MeV @ Centro di Proton Terapia

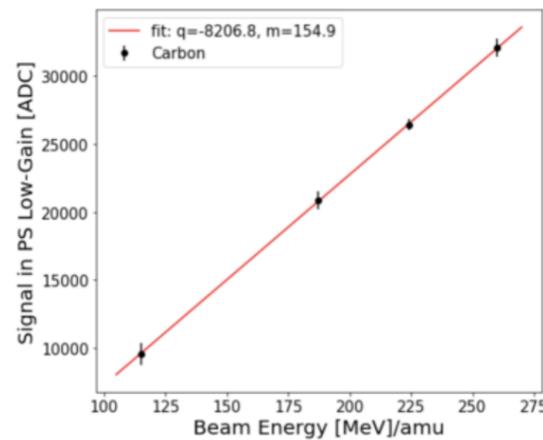
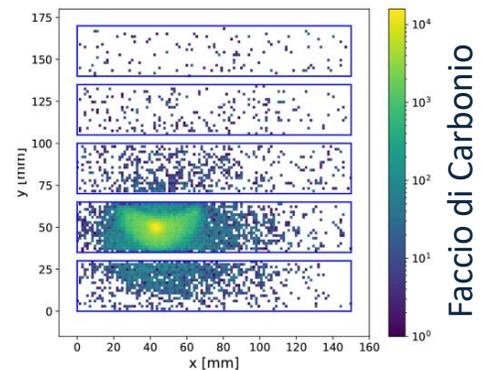
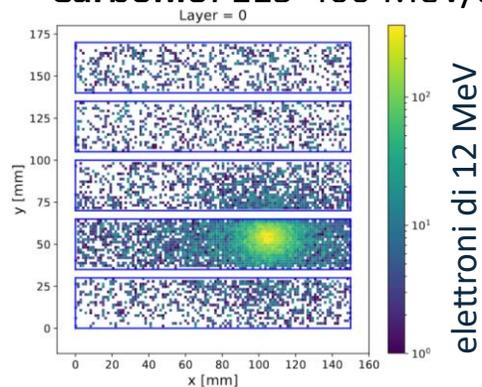
Carbonio, 115-400 MeV/amu @ CNAO, Pavia (Italia)



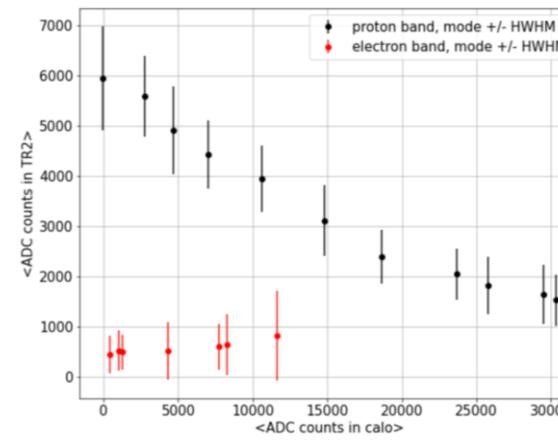
Electron test beam at **Linac Santa Chiara**



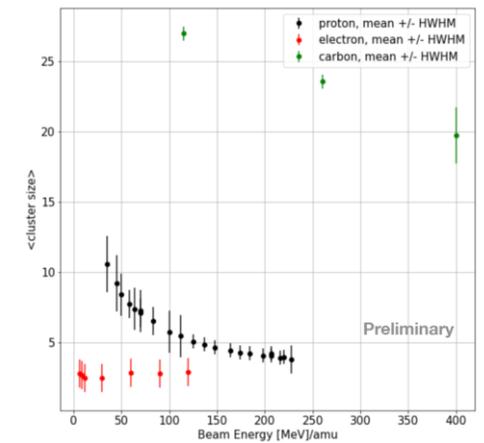
Carbon test beam at **CNAO, Pavia**.



Linearità del segnale con l'energia



Identificazione delle particelle



Cluster size vs energia

(courtesy U.Savino, PSD 2023)

Lancio del satellite a fine 2024!

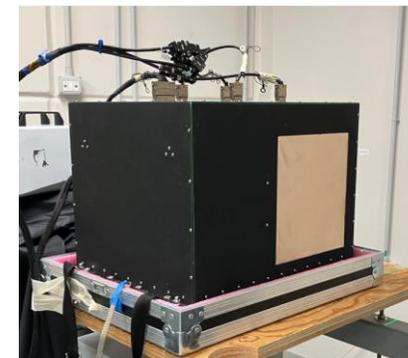
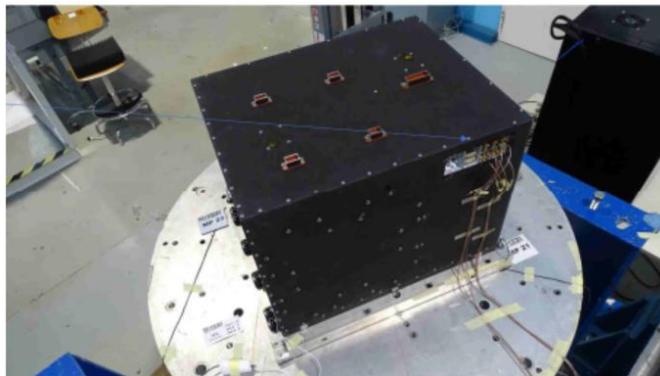
Conclusioni

HEPD-02 ha superato tutti i test di qualifica spaziale ed è stato spedito in Cina

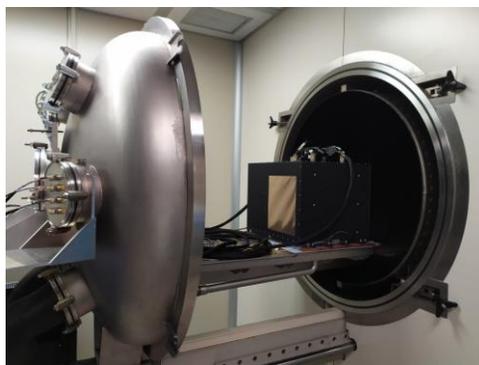


Test termici al Serms, Terni
Temperature da -20 °C a $+45\text{ °C}$;

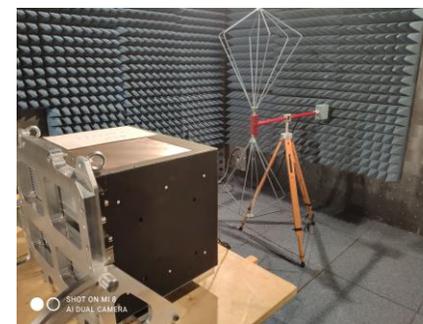
Test di vibrazione



HEPD-02 integrato



Test di termo-vuoto
Pressione $< 6.65 \cdot 10^{-3}\text{ Pa}$.
Temperature da -20 °C a $+45\text{ °C}$;



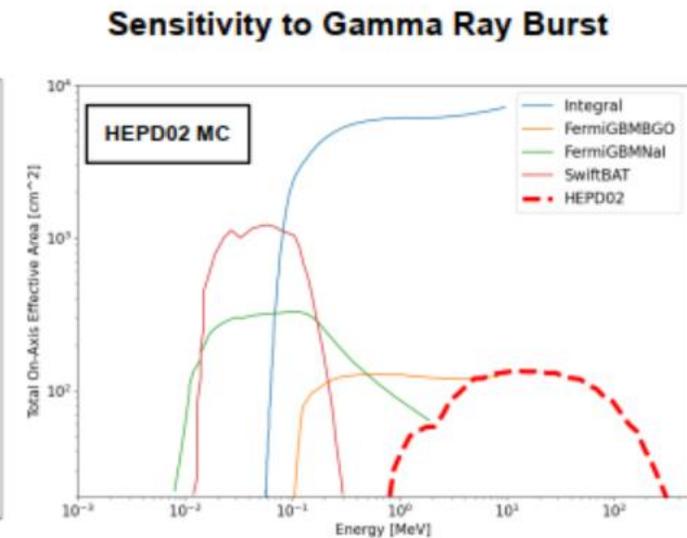
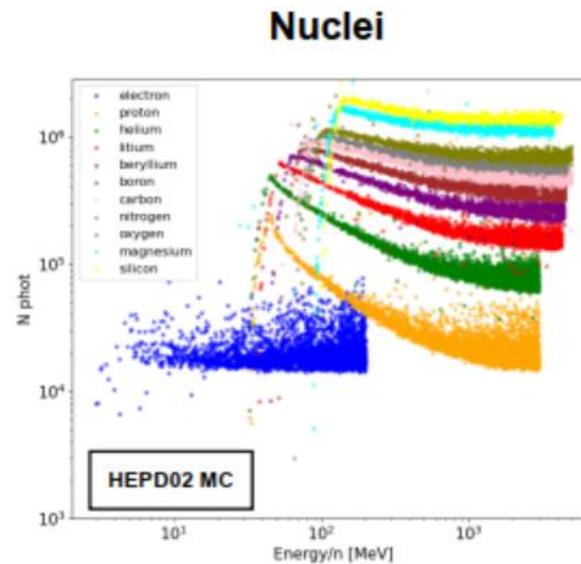
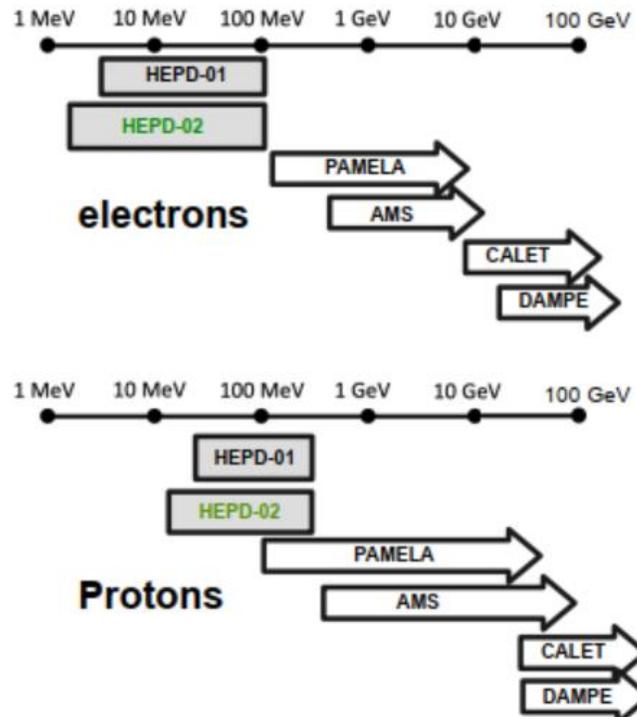
Prove di compatibilità Elettromagnetica EMI-EMC a l'IFAC, Firenze

Cluster size vs energia



Conclusioni

- IL Design innovativo di HEPD-02 ci permetterà di estendere lo studio dello spazio vicino alla terra iniziato da HEPD-01.



Conclusioni

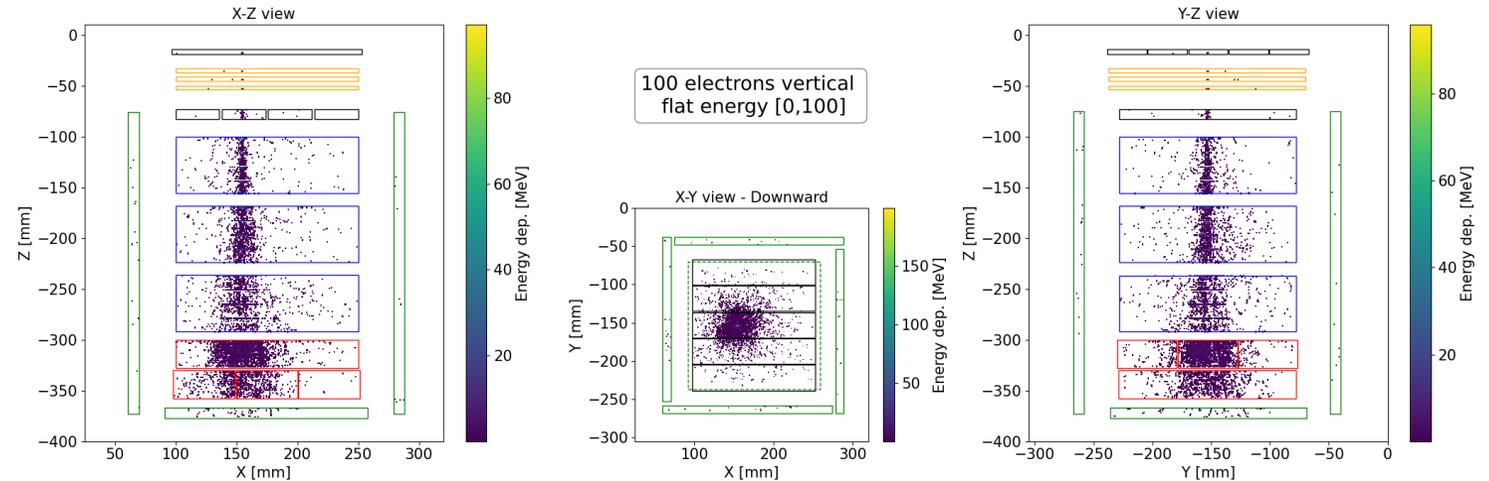
- IL Design innovativo di HEPD-02 ci permetterà di estendere lo studio dello spazio vicino alla terra iniziato da HEPD-01.
- Primo uso di MAPS per un esperimento spaziale e primo uso di cristalli LYSO di così grande dimensione;
- HEPD-02 dimostra buone capacità di ricostruzione sia in energia che angolare;
- Il modello di volo (FM) è stato integrato su CSES-02 ad inizio anno **2024**, e sta svolgendo gli ultimi test per in lancio del satellite a fine anno!

Ricostruzione dell'Energia

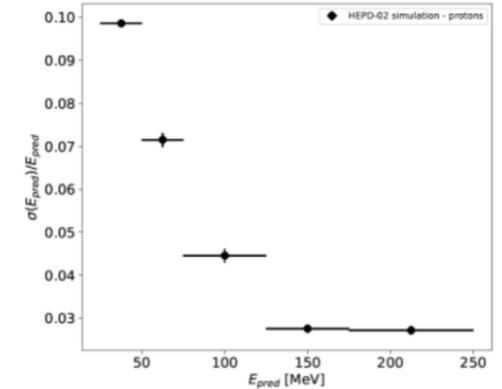
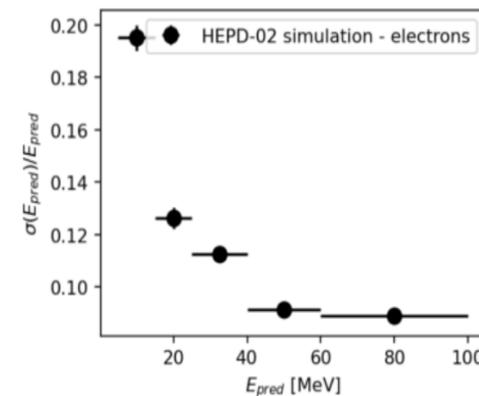
ADC signals from the calorimeter and the particle impact position and direction

→ reconstruct the deposited energy.

→ corrections for the energy lost in the inert materials using MC



Energy resolution limited by multiple scattering at low energies;

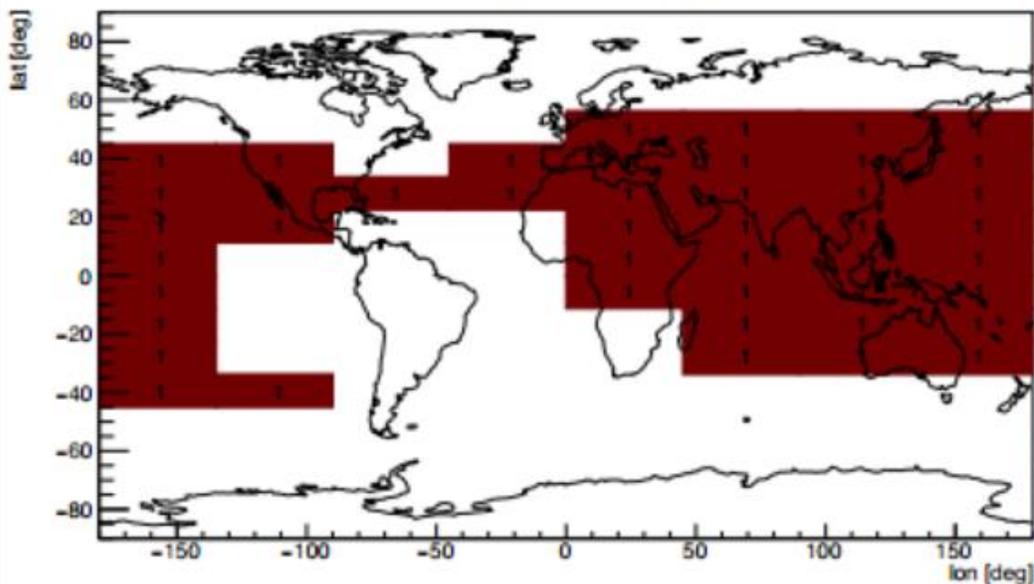


Resolution in energy from MC
(courtesy F. Follega, ICRC 2023, 116)

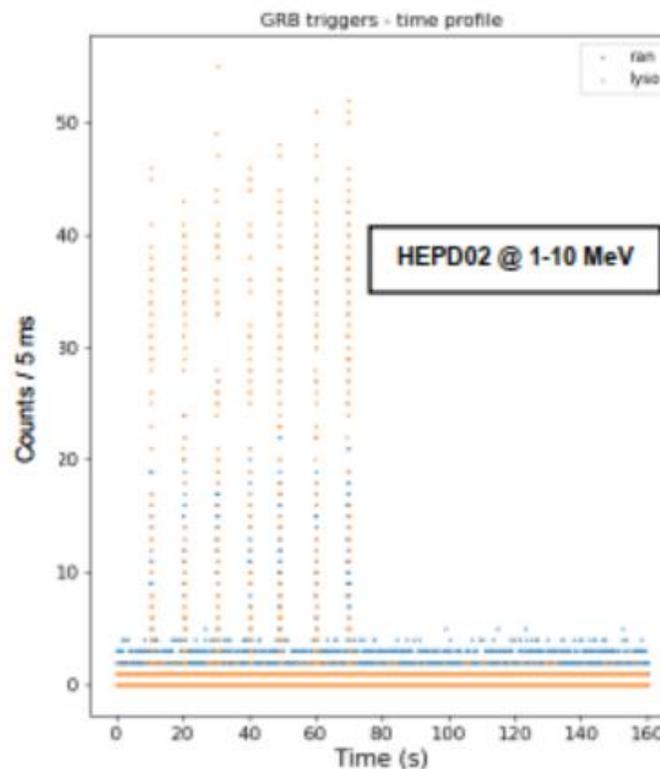
Test delle maschere GRB

Due maschere di trigger GRBs sono stati disegnati per HEPD-02 usando sia i scintillatori plastici che i cristalli di LYSO. Sono stati testati al LINAC di Trento.

GRB acquisition region



7 consecutive <1 sec
gamma pulses



Single ~10
second pulse

