

# L'esperienza GAPS per l'indagine della materia oscura

Luca Ghislotti<sup>1,2</sup>  
a nome della collaborazione GAPS  
luca.ghislotti@unibg.it

## L'esperienza

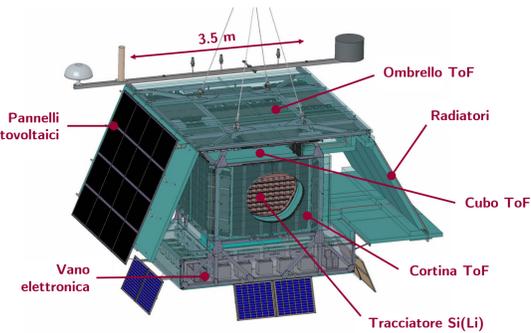
**GAPS** (General AntiParticle Spectrometer) è un esperimento condotto attraverso l'utilizzo di un pallone stratosferico concepito per rivelare antinuclei di raggi cosmici a bassa energia ( $< 0.25$  GeV) come firma indiretta della **materia oscura**. L'esperimento sfrutta un innovativo sistema di identificazione delle particelle basato sulla formazione di un atomo eccitato e la sua conseguente diseccitazione e decadimento [1]. GAPS è frutto di una collaborazione internazionale che vede tra i suoi principali esponenti **NASA, JAXA, INFN e ASI**.



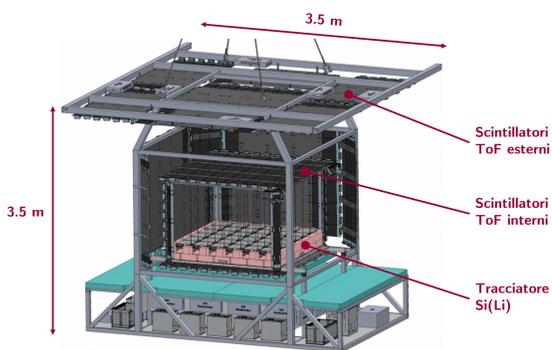
Lo strumento è attualmente in fase d'integrazione, test e calibrazione presso lo Space Sciences Laboratory di Berkeley (CA, USA) in preparazione per il primo lancio, previsto dalla base di McMurdo in **Antartide** nell'estate australe del 2023.

## Lo strumento

Lo **strumento GAPS** consiste in un tracciatore realizzato in forma modulare da rivelatori Silicio-Litio, Si(Li), circondato da un sistema di scintillatori plastici che sfrutta il principio del tempo di volo (ToF, Time of Flight).



Il **tracciatore** è stato concepito per ospitare 1440 rivelatori Si(Li) da 10 cm di diametro e 2.5 mm di spessore, disposti su 10 layer da 36 moduli ciascuno a formare un volume utile di  $1.6 \text{ m} \times 1.6 \text{ m} \times 1.0 \text{ m}$ . Durante il volo, i rivelatori sono mantenuti a temperatura operativa compresa tra  $-50^\circ\text{C}$  e  $-30^\circ\text{C}$  grazie ad un sistema di raffreddamento basato sul principio dell'Oscillating Heat Pipe (OHP) [2].



Il **sistema a tempo di volo** è composto da 160 scintillatori plastici, ognuno letto attraverso 6 fotomoltiplicatori al silicio. L'insieme ombrello, cortina e cubo ToF garantisce la ricostruzione della traiettoria della particella incidente con una risoluzione temporale  $< 400$  ps e spaziale  $\sim 4$  cm [3].

## Il principio

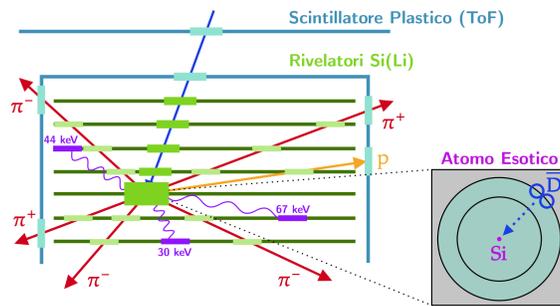
**Antideuteroni** a bassa energia e nuclei di **antielio-3** sono oggetto di ricerca di eventi rari e poiché il flusso astrofisico previsto è di diversi ordini di grandezza inferiore alla sensibilità degli esperimenti attuali, qualsiasi evento indicherebbe nuova fisica [4].

### Modalità di rivelazione delle particelle

Quando un antinucleo a bassa energia attraversa lo strumento GAPS:

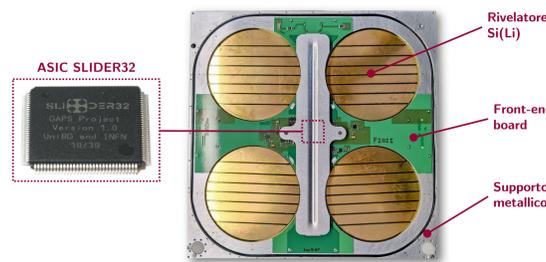
- attraversa l'apparato ToF, che misura la variabile cinematica  $\beta = v/c$ ;
- rallenta per ionizzazione e diseccitazione nel tracciatore;
- quando l'energia cinetica è comparabile all'energia di legame degli atomi target (Al o Si) viene catturato formando un atomo esotico eccitato;

- l'atomo esotico si diseccita tramite l'emissione di elettroni Auger e raggi X;
- i raggi X possono essere rivelati nei detector Si(Li) circostanti, con energie determinate in modo univoco dalla massa e dalla carica dell'antinucleo e dell'atomo bersaglio.



## Il modulo Si(Li)

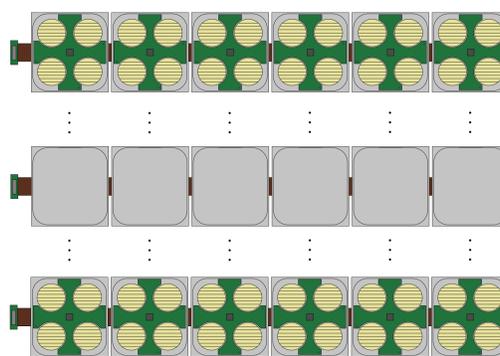
I moduli costituenti il tracciatore sono realizzati su un supporto metallico che ospita 4 rivelatori Si(Li), ciascuno suddiviso in 8 strip in grado di fornire una risoluzione energetica dei raggi X  $< 4$  keV nell'intervallo  $20 \div 100$  keV e una risoluzione  $< 10\%$  fino a 100 MeV.



La lettura delle 32 strip dei rivelatori Si(Li) è effettuata tramite un Application Specific Integrated Circuit (ASIC) realizzato in tecnologia CMOS da 180 nm denominato **SLIDER32** (32 channels Si-Li DETector Readout ASIC) avente le seguenti caratteristiche:

- canali di lettura: 32;
- temperatura operativa:  $-40^\circ\text{C}$ ;
- dissipazione di potenza:  $< 10$  mW/ch;
- risoluzione analogica: 4 keV;
- corrente di leakage per strip Si(Li):  $5 \div 10$  nA.

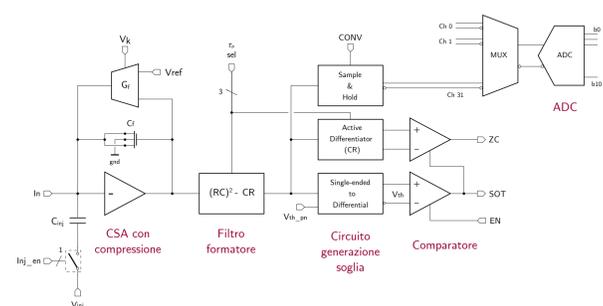
Il circuito integrato di lettura è collocato su una front-end board che ne permette il collegamento ai rivelatori Si(Li), alle alimentazioni analogiche e digitali e alla tensione di polarizzazione dei rivelatori, pari a  $-250$  V.



I moduli sono disposti in piani, ciascuno composto da 6 righe costituite da 6 moduli ognuna. La lettura è effettuata per riga grazie al collegamento in serie dei moduli per mezzo di schede rigido-flessibili.

### Il canale di lettura

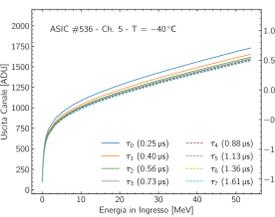
Il canale analogico di lettura include un **amplificatore di carica** (CSA, Charge Sensitive Amplifier) che integra il segnale di corrente associato alla carica raccolta nelle strip dei rivelatori Si(Li).



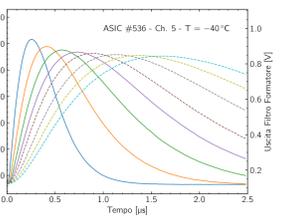
Per garantire un ampio range dinamico ed elevata risoluzione a basse energie, la rete di feedback del CSA è implementata attraverso una capacità

MOS non lineare in grado di realizzare una **compressione dinamica** del segnale. Una rete di Krummenacher è adibita al ripristino della carica e alla compensazione della corrente di leakage della singola strip [5].

### Funzione di trasferimento

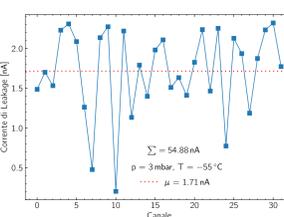


### Uscita filtro formatore

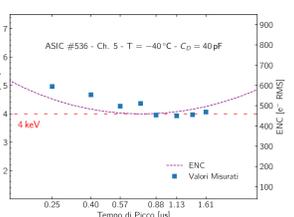


Per ottimizzare il rapporto segnale-rumore viene impiegato un **filtro formatore** tempo-invariante con funzione di formatura unipolare semi-gaussiana di tipo RC<sup>2</sup>-CR avente 8 *tempi di picco* selezionabili compresi tra 0.25  $\mu\text{s}$  e 1.61  $\mu\text{s}$  [6].

### Leakage Current



### Equivalent Noise Charge



Il campionamento del segnale in uscita dal filtro formatore può essere effettuato in una duplice modalità:

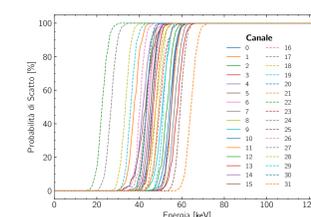
- **self-trigger**: il segnale di campionamento è generato internamente per mezzo di un blocco discriminatore;
- **trigger ToF**: il segnale di campionamento viene fornito dal sistema a tempo di volo.

Il segnale campionato viene infine digitalizzato e trasferito al **back-end digitale**, che include il *Data Acquisition/slow control system* (DAQ).

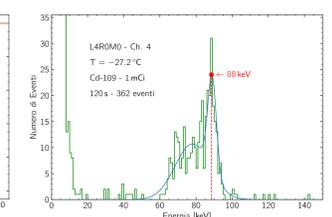
## Integrazione e calibrazione

Il sistema è attualmente in fase di integrazione e validazione [7]. Uno dei principali obiettivi è la precisa determinazione della soglia del canale (in keV) attraverso **scan di carica** per la calibrazione della scala di energia.

### Scan di carica



### Test con <sup>109</sup>Cd



Il sistema a tempo di volo e l'elettronica di lettura sono attualmente in fase d'integrazione allo scopo di validare la funzionalità del **trigger ToF**.

### I prossimi passi

- Ultimata la fase d'integrazione, lo strumento verrà testato in termovoto presso i laboratori National Technical Systems (NTS) di Los Angeles (CA, USA) nel mese di giugno 2023.
- L'ultima fase di validazione e preparazione per il lancio verrà svolta nel mese di agosto 2023 presso la Columbia Scientific Balloon Facility a Palestine (TX, USA).
- Il primo lancio è previsto dalla base della National Science Foundation di McMurdo in Antartide a dicembre 2023.

### Riferimenti

[1] P. Von Doetinchem, et al. "Cosmic-ray antinuclei as messengers of new physics: status and outlook for the new decade", *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, 2020.

[2] S. Okazaki, et al. "Meter-scale multi-loop capillary heat pipe", *Appl. Thermal Eng.* Vol. 141, Pag. 20-28, 2018.

[3] S. Quinn, "Recent Progress on the GAPS Time of Flight System", *36th International Cosmic Ray Conference, ICRC2019*, Vol. 36, Pag. 128, 2019.

[4] T. Aramaki, et al. "A measurement of atomic X-ray yields in exotic atoms and implications for an antideuteron-based dark matter search", *Astroparticle Physics*, Vol. 49, Pag. 52-62, 2013.

[5] M. Manghisoni, et al. "Low-Noise Analog Channel for the Readout of the Si(Li) Detector of the GAPS Experiment", *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 2021.

[6] V. Re, et al. "A mixed-signal processor for X-ray spectrometry and tracking in the GAPS experiment", *Nuclear Instr. and Methods in Physics Research*, 2023.

[7] E. Riceputi, et al. "The 32 analog channels readout for the long-flight GAPS balloon experiment tracking system", *Proceedings of SIE 2022*, Springer, 2023.