

# Studio di rivelatori al silicio per esperimenti spaziali

XXXVII CICLO – CORSO DI DOTTORATO DI RICERCA IN FISICA  
Jiang Yaozu

Tutors: prof. Bruna Bertucci, Dott. Matteo Duranti

# RAGGI COSMICI

*Quali particelle formano i Raggi Cosmici ?*

- ~ 90% Protoni
- ~ 9 % Elio
- ~ 1 % tutti gli altri nuclei
- ~ 1% di elettroni
- ~ 0.1% positroni, antiprotoni
- ...

*Perché studiare i raggi cosmici è importante?*

- capire i meccanismi di produzione e accelerazione
- capire l'ambiente attraversato nel viaggio fino alla Terra (InterStellar Matter, ISM)
- ricercare segnali esotici o di nuova fisica (anti-materia primordiale, dark-matter, ...)



esplosione di una supernova



Hess di ritorno dal suo volo in mongolfiera nell'agosto 1912

# LO "SPETTRO" DEI RAGGI COSMICI

Il flusso (numero per unità di area, angolo solido e tempo) di raggi cosmici che colpiscono la Terra diminuisce molto rapidamente al crescere dell'energia

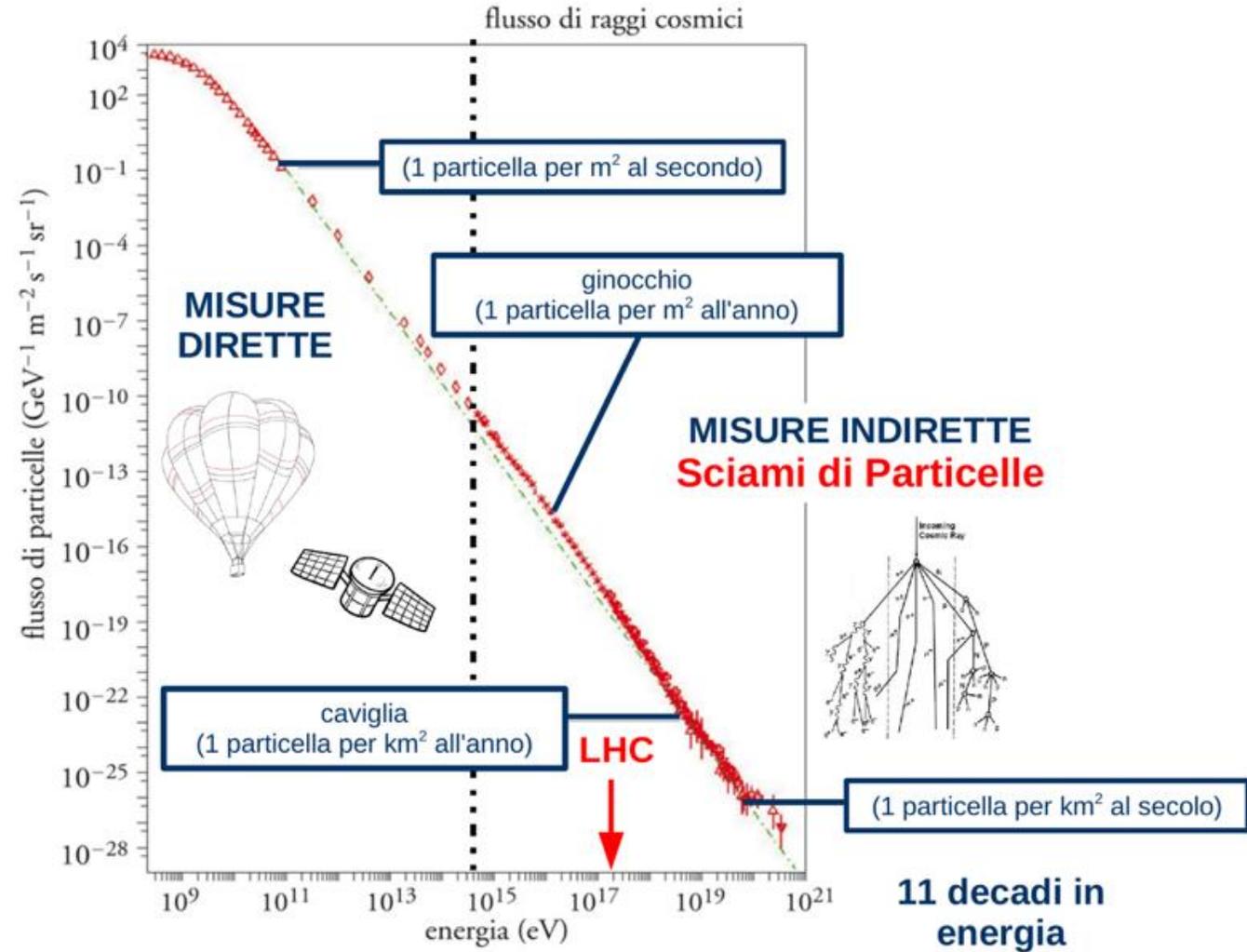
$E_0 \approx 10^8 \text{ eV} \rightarrow 100 \text{ eventi /m}^2\text{/secondo}$

$E_0 \approx 10^{15} \text{ eV} \rightarrow 1 \text{ evento /m}^2\text{/anno}$

$E_0 \approx 10^{19} \text{ eV} \rightarrow 1 \text{ evento /km}^2\text{/anno}$

$E_0 > 10^{20} \text{ eV} \rightarrow 1 \text{ evento /km}^2\text{/secolo}$

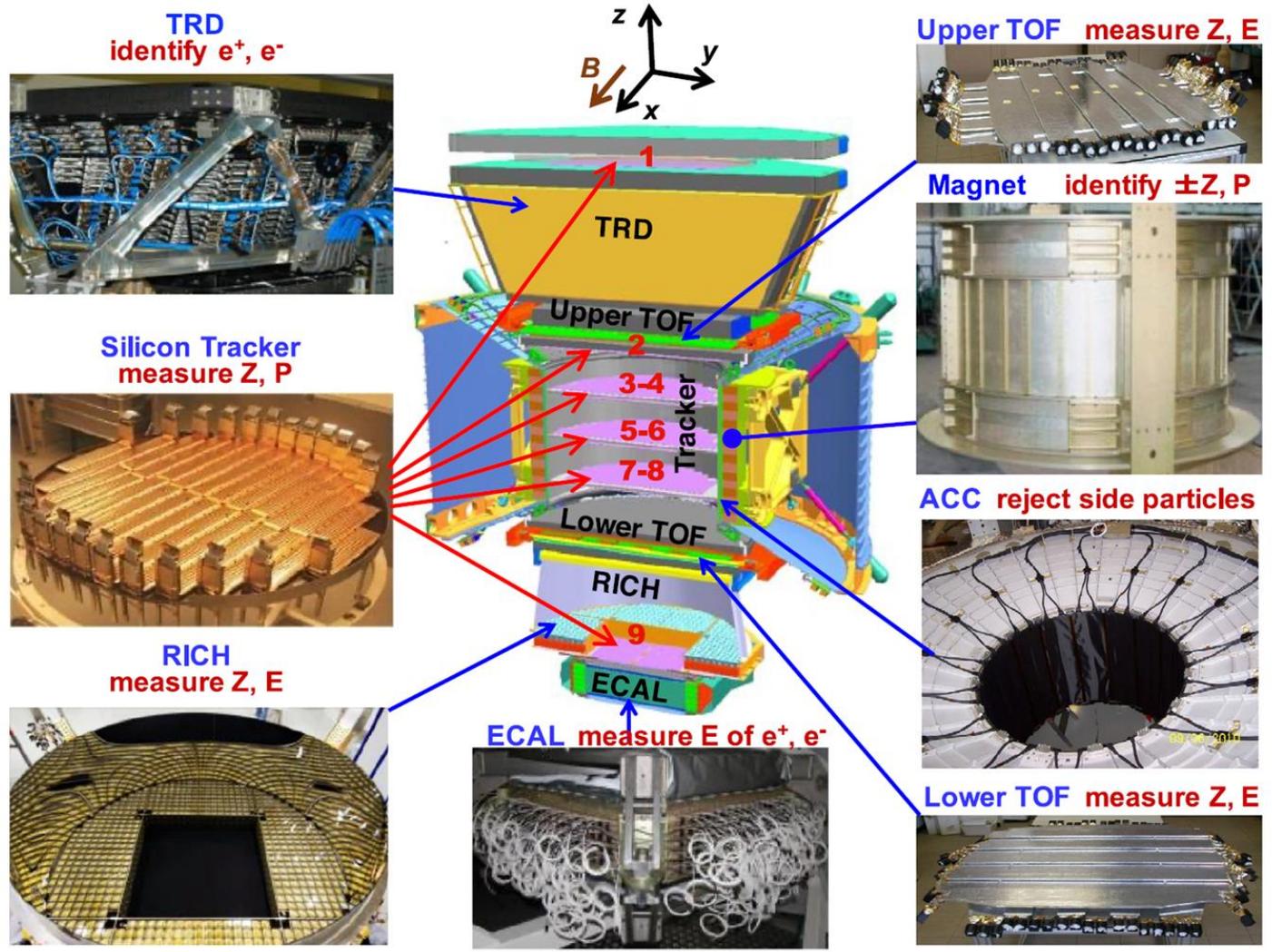
32 decadi in intensità



# ALPHA MAGNETIC SPECTROMETER (AMS-02)

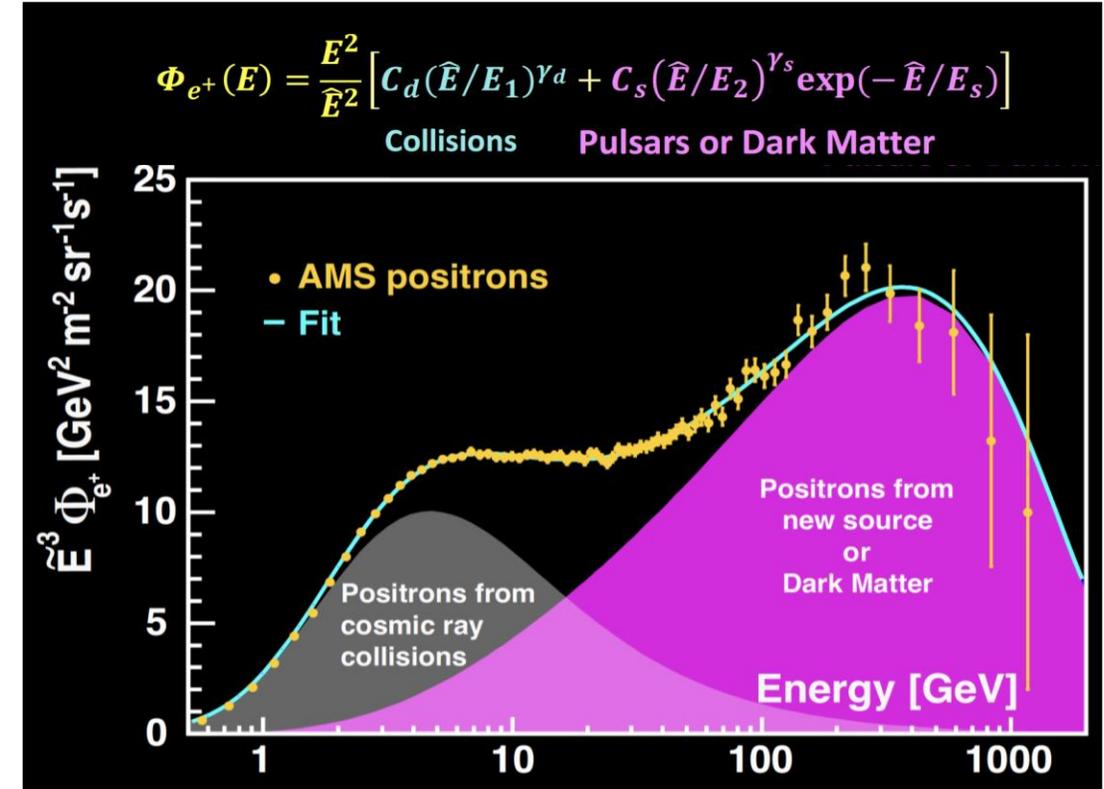
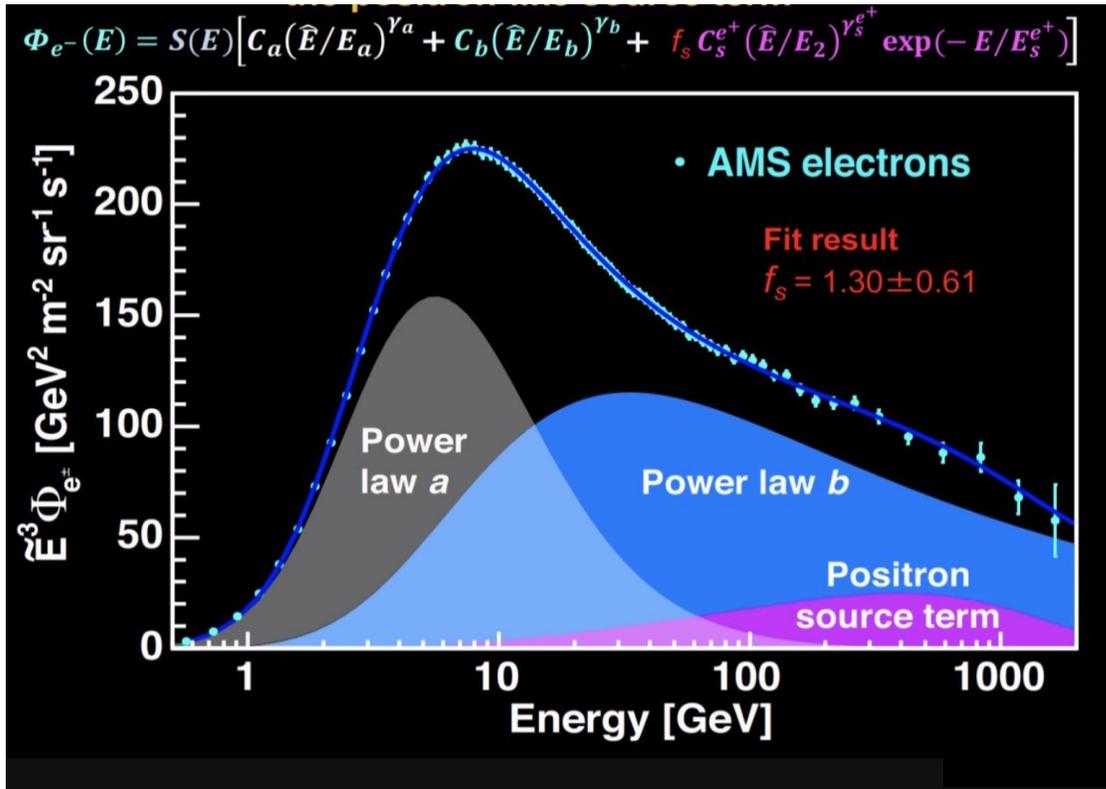


# ALPHA MAGNETIC SPECTROMETER (AMS-02)



# Qualche risultato di AMS: $e^-$ , $e^+$

(Phys. Rep. 2021)

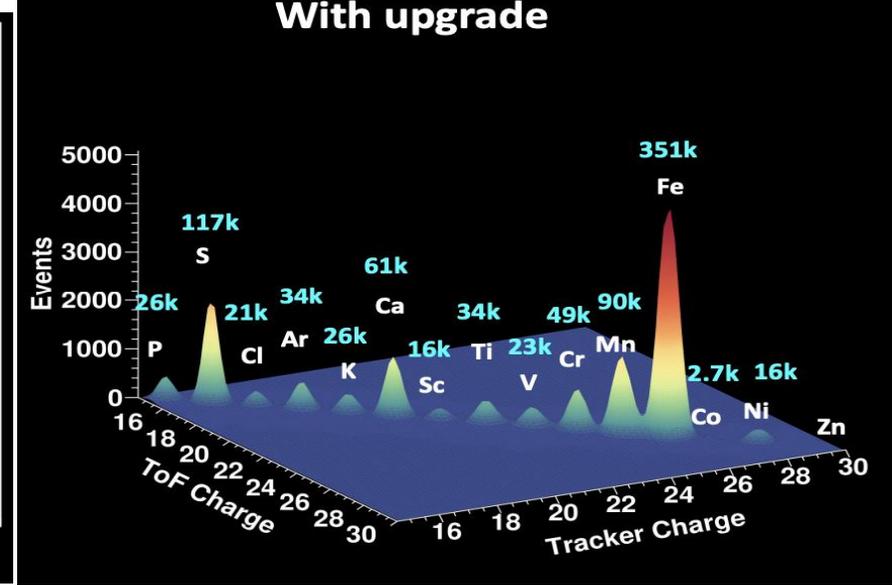
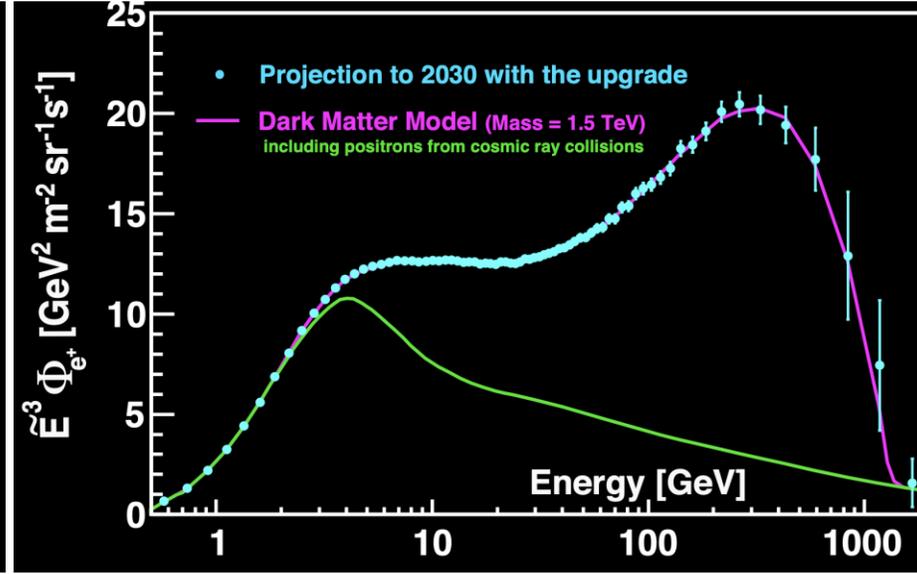
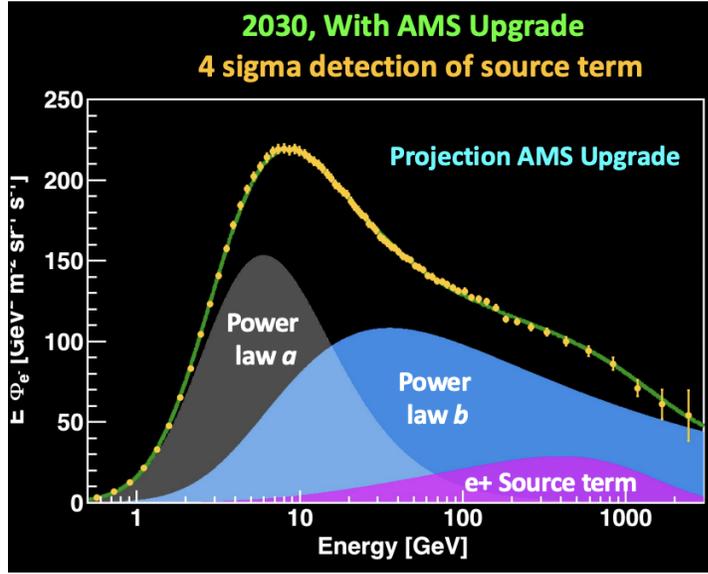
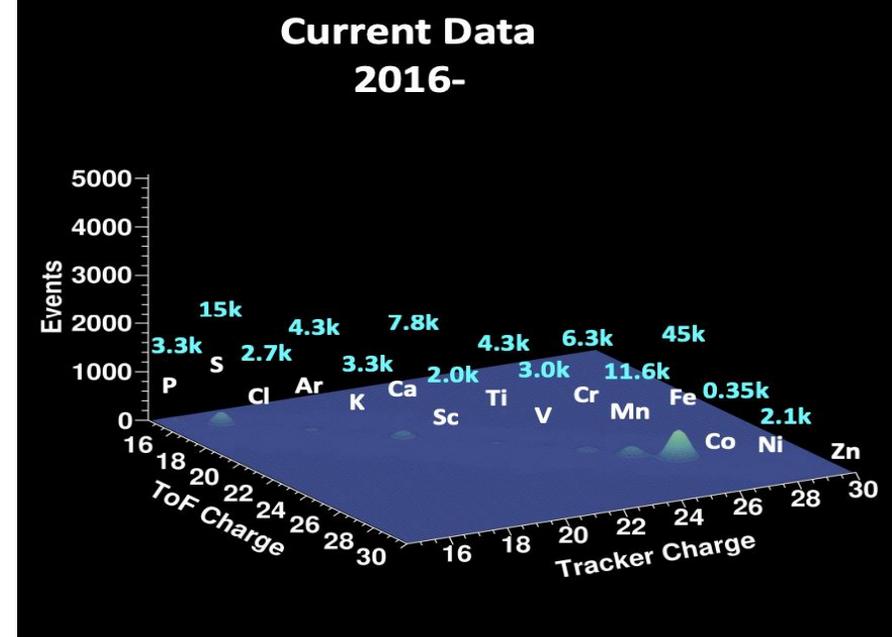
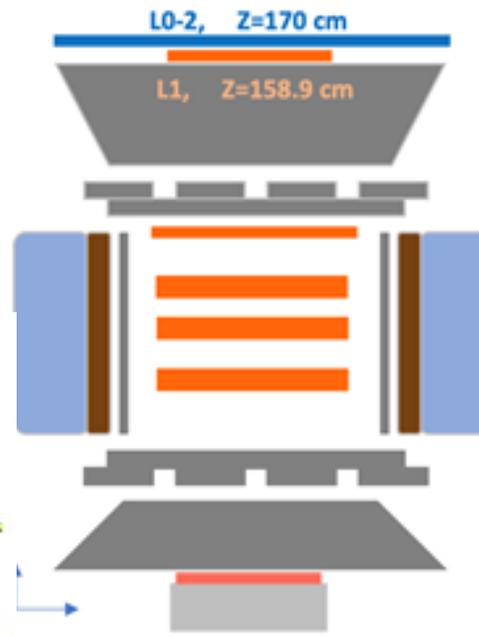
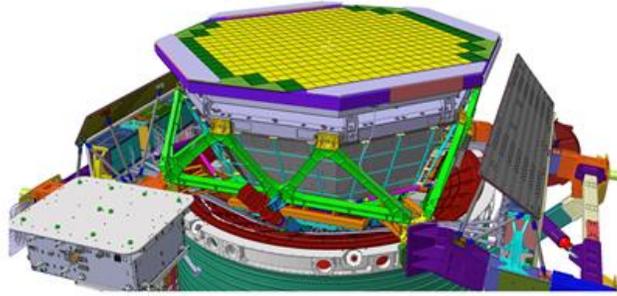


L'origine dei positroni ed elettroni di alta energia è ancora dibattuta

La misura di precisione dei flussi alle alte energie è cruciale per studiare i cambi di indice spettrale ed evidenziare le caratteristiche di nuove sorgenti (dark matter) di positroni ed elettroni

# UPGRADE 2024

- "L0", piano addizionale di rivelatori al silicio in cima a AMS-02 (2 strati, ~ 7 m<sup>2</sup>) da installare nel 2024
- incremento 300% dell'accettanza per aggiungere sensibilità alle alte energie nella misura di componenti rare

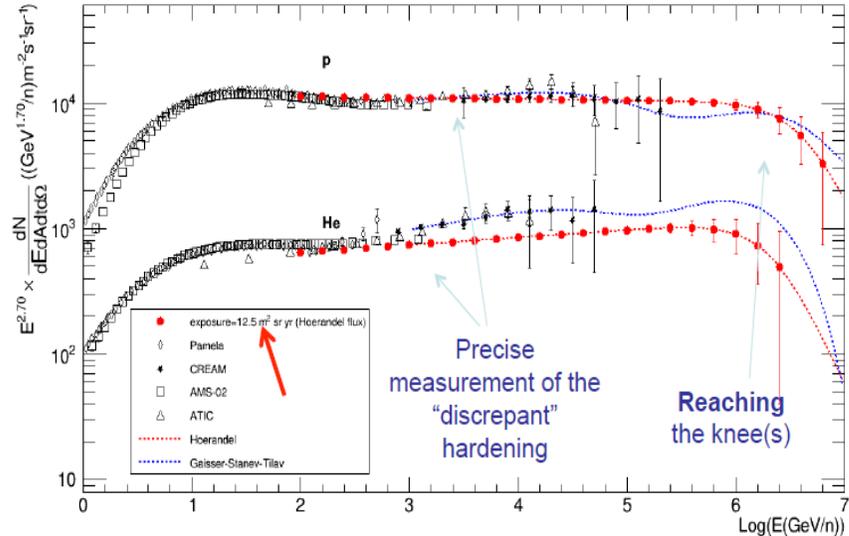


# L'ESPERIMENTO HERD

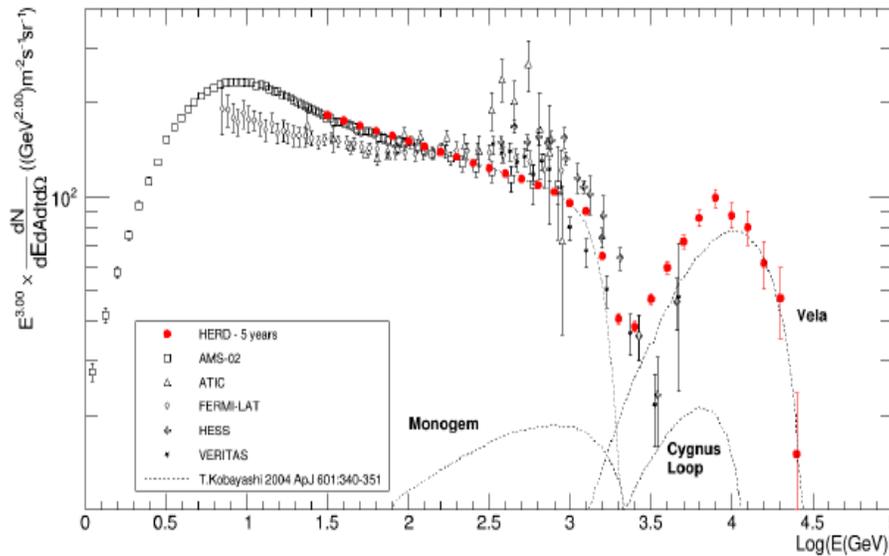
➤ a bordo della Stazione Spaziale Cinese, CSS a partire dal 2027

*Obiettivi scientifici:*

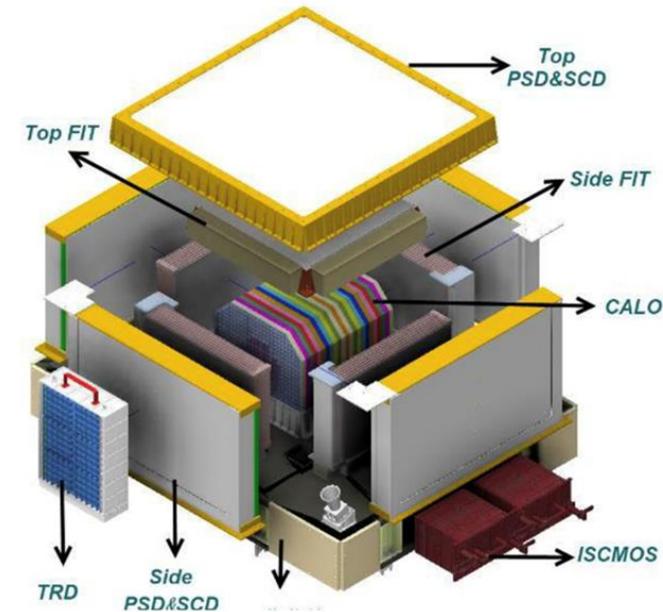
- rivelazione indiretta di particelle di materia oscura
- studio della composizione dei raggi cosmici fino al PeV
- osservazione di raggi gamma ad alta energia



H ed He: prima misura diretta fino al PeV per osservare il "ginocchio"



$e^+e^-$ : misura diretta fino alle decine di TeV con risoluzione del %.



# L'ESPERIMENTO HERD - SCD

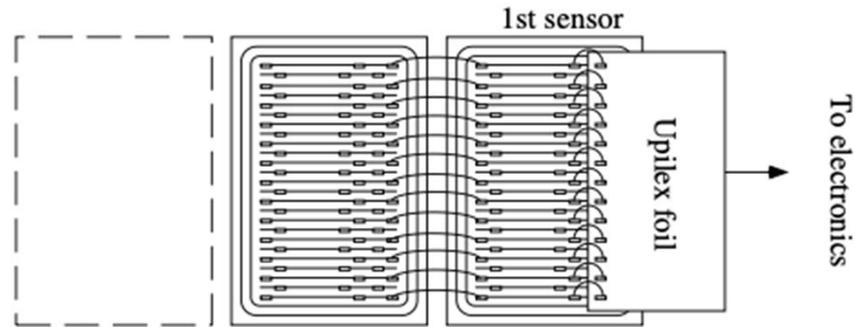
## Silicon Charge Detector:

- 6 o 8 piani rivelatori a microstrip di silicio in configurazione odoscopica (X-Y)
- rivelatore più esterno per misura di carica, Z, prima di ogni possibile frammentazione nei materiali del rivelatore
- tracciatore con discreta (15-20  $\mu\text{m}$ ) risoluzione spaziale

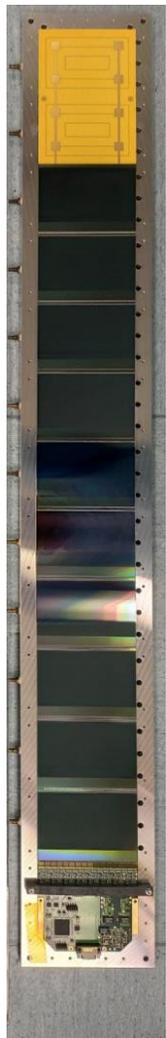


# LADDER LUNGHI PER HERD / AMS - L0

- dimensione di un sensore:  $10 \times 10 \text{ cm}^2$  (HERD) e  $8 \times 13 \text{ cm}^2$  (AMS-L0)
- lunghezza ladder:  $\sim 1 \text{ m}$ : per coprire aree più grandi e senza aumentare il numero di canali

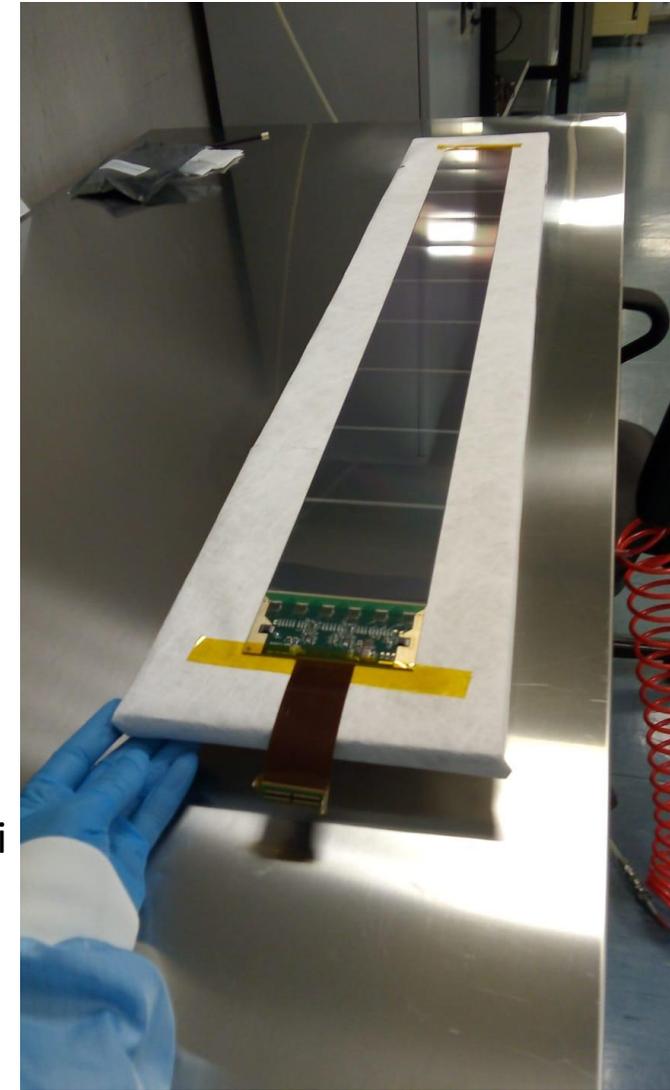


"daisy chain" di 10-12 sensori: la strip  $i^{\text{esima}}$  del primo (collegato all'elettronica di lettura) ha un "bonding" verso la  $i^{\text{esima}}$  del secondo, e così via



## AMS-L0:

- pitch di impianto (lettura):  $27.5 (110) \mu\text{m}$
- 1024 canali per ladder

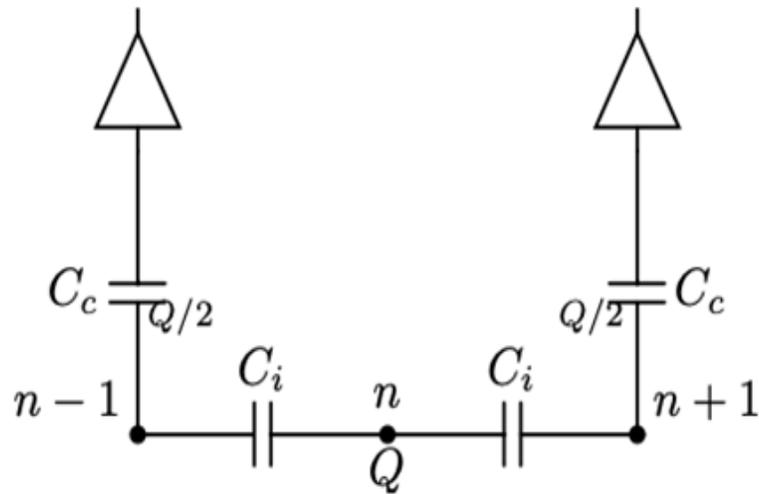
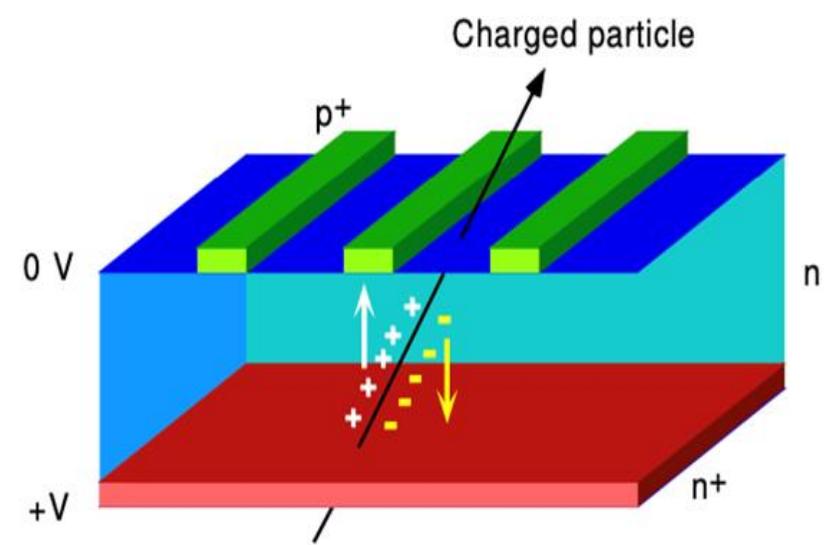


## HERD:

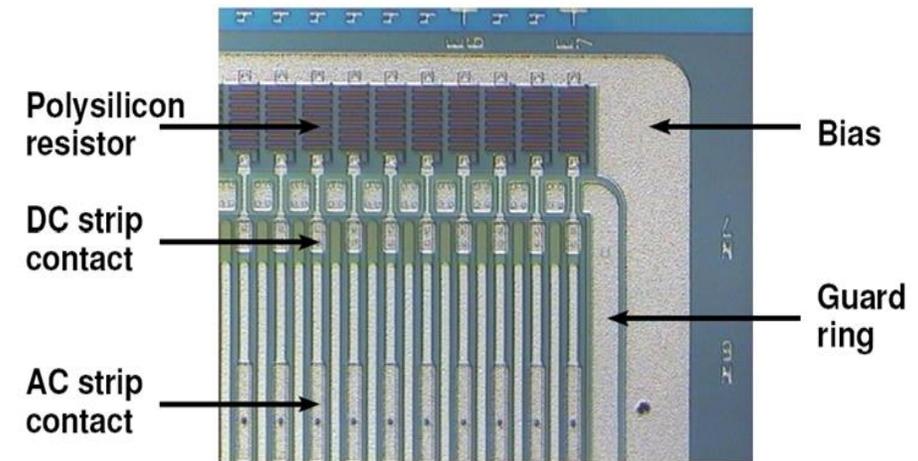
- pitch di impianto (lettura):  $50 (150) \mu\text{m}$
- 640 canali per ladder

# IL RIVELATORI A MICROSTRIP AL SILICIO

- principio di funzionamento: diodo in polarizzazione inversa
- la ionizzazione nella zona di svuotamento è raccolta, come segnale, dagli elettrodi di raccolta ("strip")
- l'ampiezza del segnale raccolto determina la carica,  $Z$ , della particella incidente ( $dE/dx \propto Z^2$ )

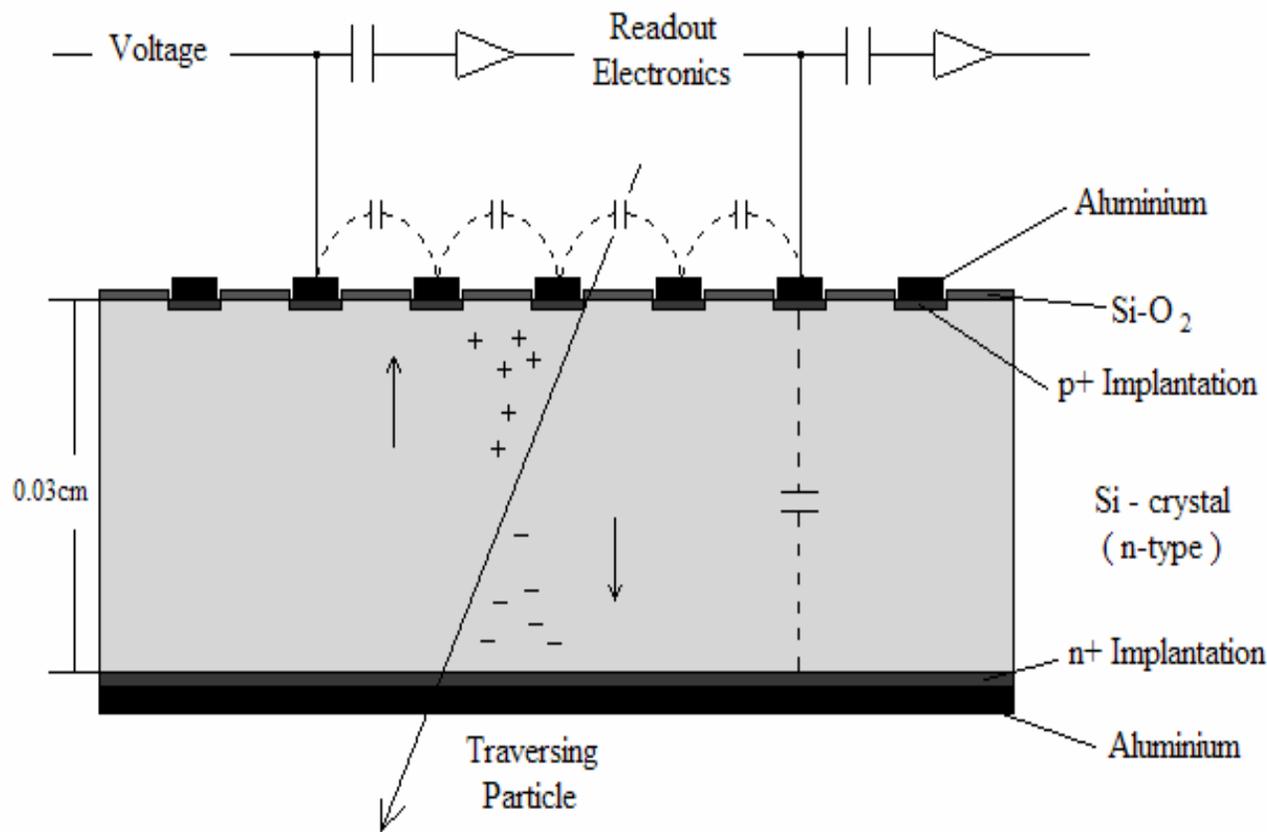


Schema equivalente delle capacità  
Tra le strip e l'elettronica di lettura



Dettagli dell'implementazione dei contatti  
per l'alimentazione e la lettura del rivelatore

# RISOLUZIONE SPAZIALE DI LETTURA ANALOGICA



Rappresentazione schematica della configurazione di lettura analogica con "floating strips"

Posizione misurata: baricentro di carica fra le strips "accese"

$$X_{bari} = \frac{\sum_i x_i \times h_i}{\sum_i h_i}$$

Risoluzione:

$$\sigma_X \approx \frac{p}{SNR}$$

SNR: rapporto Segnale/Rumore

# STIMA DEL RUMORE E IDENTIFICAZIONE DEL SEGNALE

- "pedistallo": valore medio misurato su ciascun canale in assenza di segnale fisico

$$\text{PED}_{\text{ch}} = \frac{\sum_{\text{ev}} \text{ADC}_{\text{ch,ev}}}{N_{\text{ev}}}$$

# STIMA DEL RUMORE E IDENTIFICAZIONE DEL SEGNALE

$$\text{PED}_{\text{ch}} = \frac{\sum_{\text{ev}} \text{ADC}_{\text{ch,ev}}}{N_{\text{ev}}}$$

- "pedistallo": valore medio misurato su ciascun canale in assenza di segnale fisico
- segnale "raw" : valore misurato sul singolo canale sottratto del pedistallo ( $\text{ADC}_{\text{ch,ev}} - \text{PED}_{\text{ch}}$ )

# STIMA DEL RUMORE E IDENTIFICAZIONE DEL SEGNALE

$$\text{PED}_{\text{ch}} = \frac{\sum_{\text{ev}} \text{ADC}_{\text{ch,ev}}}{N_{\text{ev}}}$$

- "pedistallo": valore medio misurato su ciascun canale in assenza di segnale fisico
- segnale "raw" : valore misurato sul singolo canale sottratto del pedistallo ( $\text{ADC}_{\text{ch,ev}} - \text{PED}_{\text{ch}}$ )
- "sigma raw": deviazione standard del valore misurato sul singolo canale in assenza di segnale fisico

$$\sigma_{\text{raw,ch}} = \sqrt{\frac{\sum_{\text{ev}} (\text{ADC}_{\text{ch,ev}} - \text{PED}_{\text{ch}})^2}{N_{\text{ev}}}}$$

# STIMA DEL RUMORE E IDENTIFICAZIONE DEL SEGNALE

➤ "pedistallo": valore medio misurato su ciascun canale in assenza di segnale fisico

$$\text{PED}_{\text{ch}} = \frac{\sum_{\text{ev}} \text{ADC}_{\text{ch,ev}}}{N_{\text{ev}}}$$

➤ segnale "raw" : valore misurato sul singolo canale sottratto del pedistallo ( $\text{ADC}_{\text{ch,ev}} - \text{PED}_{\text{ch}}$ )

➤ "sigma raw": deviazione standard del valore misurato sul singolo canale in assenza di segnale fisico

$$\sigma_{\text{raw,ch}} = \sqrt{\frac{\sum_{\text{ev}} (\text{ADC}_{\text{ch,ev}} - \text{PED}_{\text{ch}})^2}{N_{\text{ev}}}}$$

➤ "common noise": in ogni evento è il termine di rumore comune a tutti i canali accomunati da un singolo componente elettronico (nel nostro caso i 64 canali dell'ASIC di Front-End, il VA)

$$\text{CN}_{\text{VA,ev}} = \frac{\sum_{\text{ch,ev}} (\text{ADC}_{\text{ch,ev}} - \text{PED}_{\text{ch}})}{64}$$

# STIMA DEL RUMORE E IDENTIFICAZIONE DEL SEGNALE

➤ "pedistallo": valore medio misurato su ciascun canale in assenza di segnale fisico

$$\text{PED}_{\text{ch}} = \frac{\sum_{\text{ev}} \text{ADC}_{\text{ch,ev}}}{N_{\text{ev}}}$$

➤ segnale "raw" : valore misurato sul singolo canale sottratto del pedistallo ( $\text{ADC}_{\text{ch,ev}} - \text{PED}_{\text{ch}}$ )

➤ "sigma raw": deviazione standard del valore misurato sul singolo canale in assenza di segnale fisico

$$\sigma_{\text{raw,ch}} = \sqrt{\frac{\sum_{\text{ev}} (\text{ADC}_{\text{ch,ev}} - \text{PED}_{\text{ch}})^2}{N_{\text{ev}}}}$$

➤ "common noise": in ogni evento è il termine di rumore comune a tutti i canali accomunati da un singolo componente elettronico (nel nostro caso i 64 canali dell'ASIC di Front-End, il VA)

$$\text{CN}_{\text{VA,ev}} = \frac{\sum_{\text{ch,ev}} (\text{ADC}_{\text{ch,ev}} - \text{PED}_{\text{ch}})}{64}$$

➤ segnale **S**: in un dato canale il valore misurato sottratto il pedistallo e il common noise

$$S_{\text{ch,ev}} = \text{ADC}_{\text{ch,ev}} - \text{PED}_{\text{ch}} - \text{CN}_{\text{VA,ev}}$$

# STIMA DEL RUMORE E IDENTIFICAZIONE DEL SEGNALE

➤ "pedistallo": valore medio misurato su ciascun canale in assenza di segnale fisico

$$\text{PED}_{\text{ch}} = \frac{\sum_{\text{ev}} \text{ADC}_{\text{ch,ev}}}{N_{\text{ev}}}$$

➤ segnale "raw" : valore misurato sul singolo canale sottratto del pedistallo ( $\text{ADC}_{\text{ch,ev}} - \text{PED}_{\text{ch}}$ )

➤ "sigma raw": deviazione standard del valore misurato sul singolo canale in assenza di segnale fisico

$$\sigma_{\text{raw,ch}} = \sqrt{\frac{\sum_{\text{ev}} (\text{ADC}_{\text{ch,ev}} - \text{PED}_{\text{ch}})^2}{N_{\text{ev}}}}$$

➤ "common noise": in ogni evento è il termine di rumore comune a tutti i canali accomunati da un singolo componente elettronico (nel nostro caso i 64 canali dell'ASIC di Front-End, il VA)

$$\text{CN}_{\text{VA,ev}} = \frac{\sum_{\text{ch,ev}} (\text{ADC}_{\text{ch,ev}} - \text{PED}_{\text{ch}})}{64}$$

➤ segnale **S**: in un dato canale il valore misurato sottratto il pedistallo e il common noise  $S_{\text{ch,ev}} = \text{ADC}_{\text{ch,ev}} - \text{PED}_{\text{ch}} - \text{CN}_{\text{VA,ev}}$

➤ sigma: è il "rumore" o Noise del canale, valutato come deviazione standard del segnale in assenza di particelle incidenti

$$\sigma_{\text{ch}} = \sqrt{\frac{\sum_{\text{ev}} (\text{ADC}_{\text{ch,ev}} - \text{PED}_{\text{ch}} - \text{CN}_{\text{VA,ev}})^2}{N_{\text{ev}}}}$$

# STIMA DEL RUMORE E IDENTIFICAZIONE DEL SEGNALE

➤ "pedistallo": valore medio misurato su ciascun canale in assenza di segnale fisico

$$PED_{ch} = \frac{\sum_{ev} ADC_{ch,ev}}{N_{ev}}$$

➤ segnale "raw" : valore misurato sul singolo canale sottratto del pedistallo ( $ADC_{ch,ev} - PED_{ch}$ )

➤ "sigma raw": deviazione standard del valore misurato sul singolo canale in assenza di segnale fisico

$$\sigma_{raw,ch} = \sqrt{\frac{\sum_{ev} (ADC_{ch,ev} - PED_{ch})^2}{N_{ev}}}$$

➤ "common noise": in ogni evento è il termine di rumore comune a tutti i canali accomunati da un singolo componente elettronico (nel nostro caso i 64 canali dell'ASIC di Front-End, il VA)

$$CN_{VA,ev} = \frac{\sum_{ch,ev} (ADC_{ch,ev} - PED_{ch})}{64}$$

➤ segnale **S**: in un dato canale il valore misurato sottratto il pedistallo e il common noise

$$S_{ch,ev} = ADC_{ch,ev} - PED_{ch} - CN_{VA,ev}$$

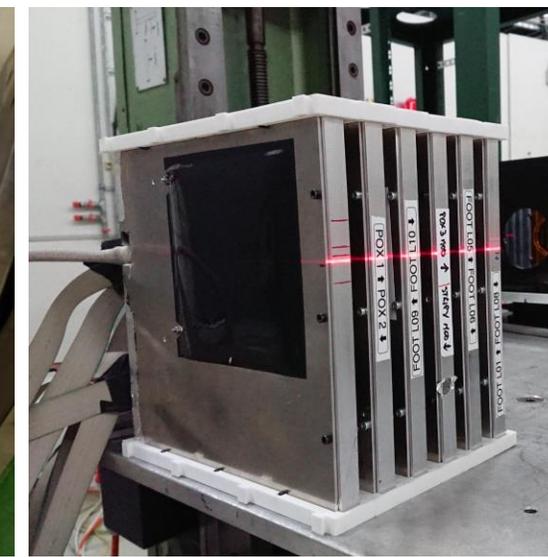
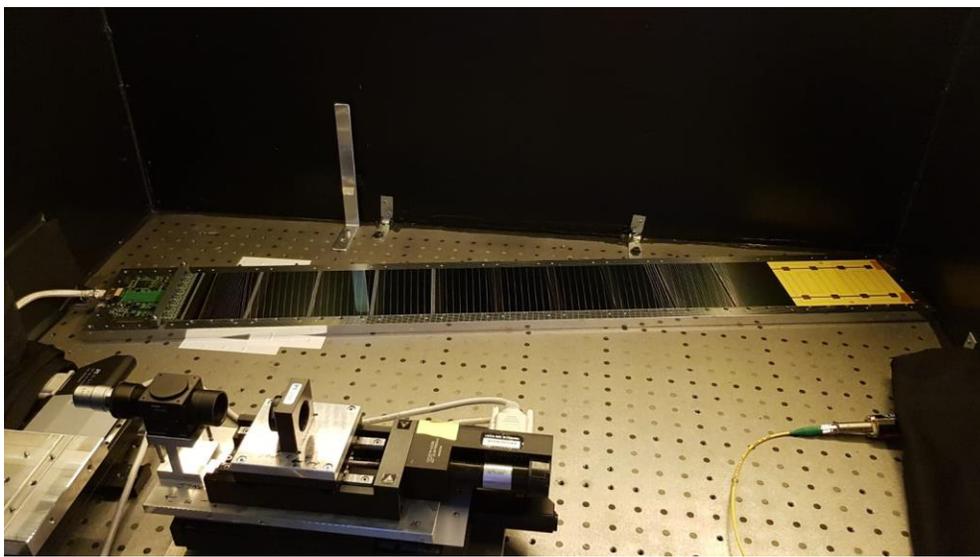
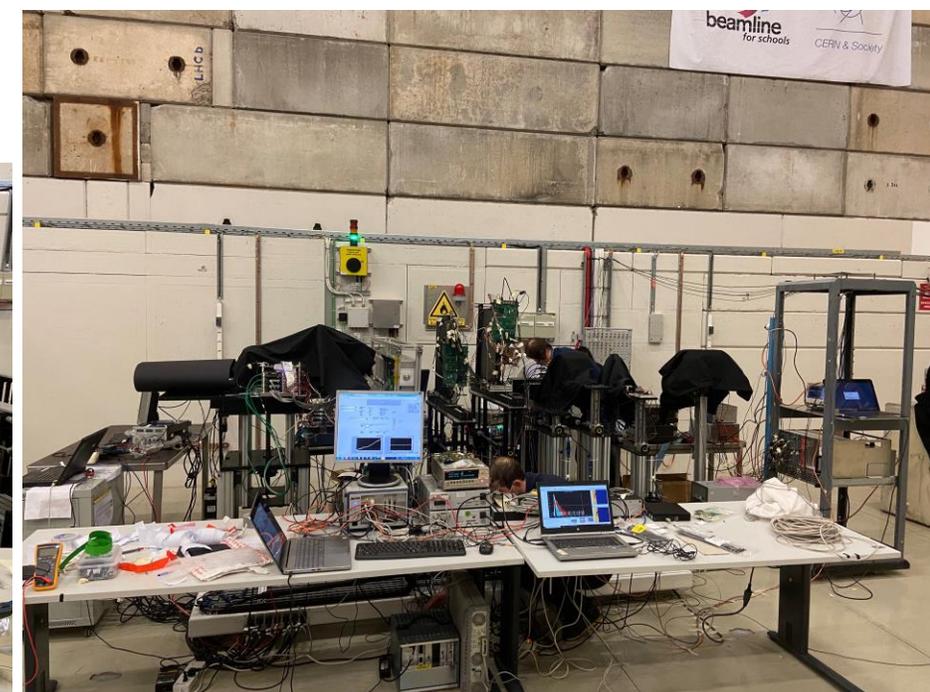
➤ sigma: è il "rumore" o Noise del canale, valutato come deviazione standard del segnale in assenza di particelle incidenti

$$\sigma_{ch} = \sqrt{\frac{\sum_{ev} (ADC_{ch,ev} - PED_{ch} - CN_{VA,ev})^2}{N_{ev}}}$$

La calibrazione consiste nella determinazione di pedistallo e rumore per ciascun canale, permettendoci quindi, evento per evento, di valutare la significatività di un segnale confrontandone l'ampiezza con il rumore ( $S/N=SNR$ )

# STUDIO DELLE PRESTAZIONI DEI SILICI

- HERD BT:
  - Oct. 2021 @ SPS (elettroni, protoni)
  - Nov. 2021 @ PS (elettroni, protoni)
- AMS-L0 BT:
  - Sep. 2022 @ PS (elettroni, protoni)
- test in laboratorio:
  - cosmici
  - laser
- prossimo HERD + AMS-L0 BT:
  - 14-28 Nov. 2022 @ SPS (ioni)



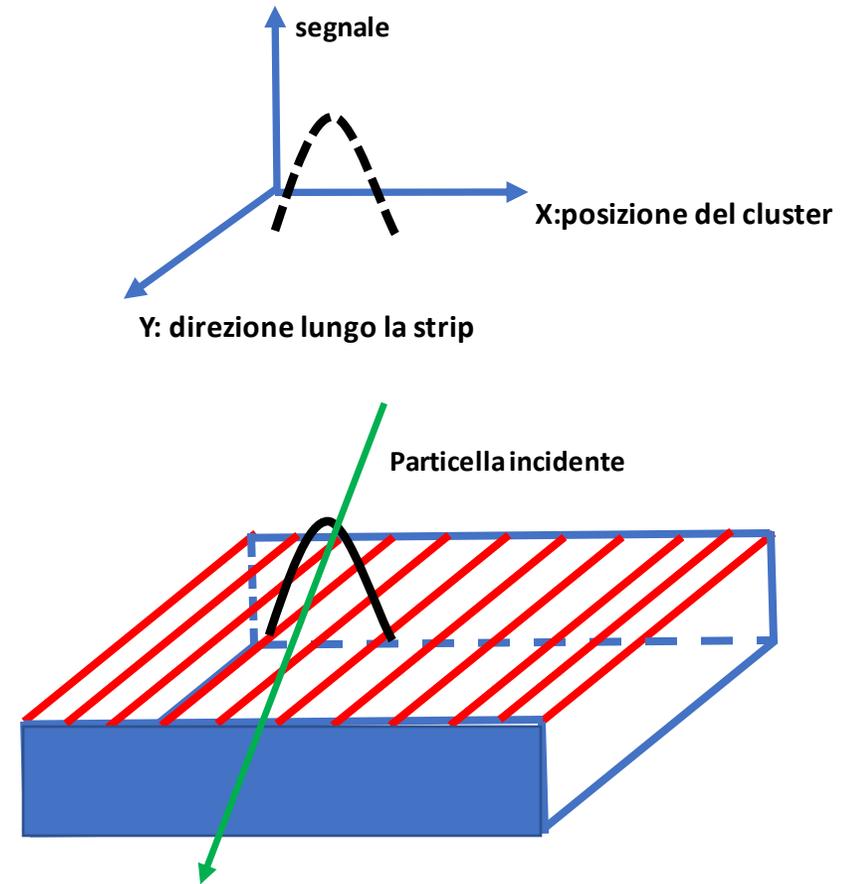
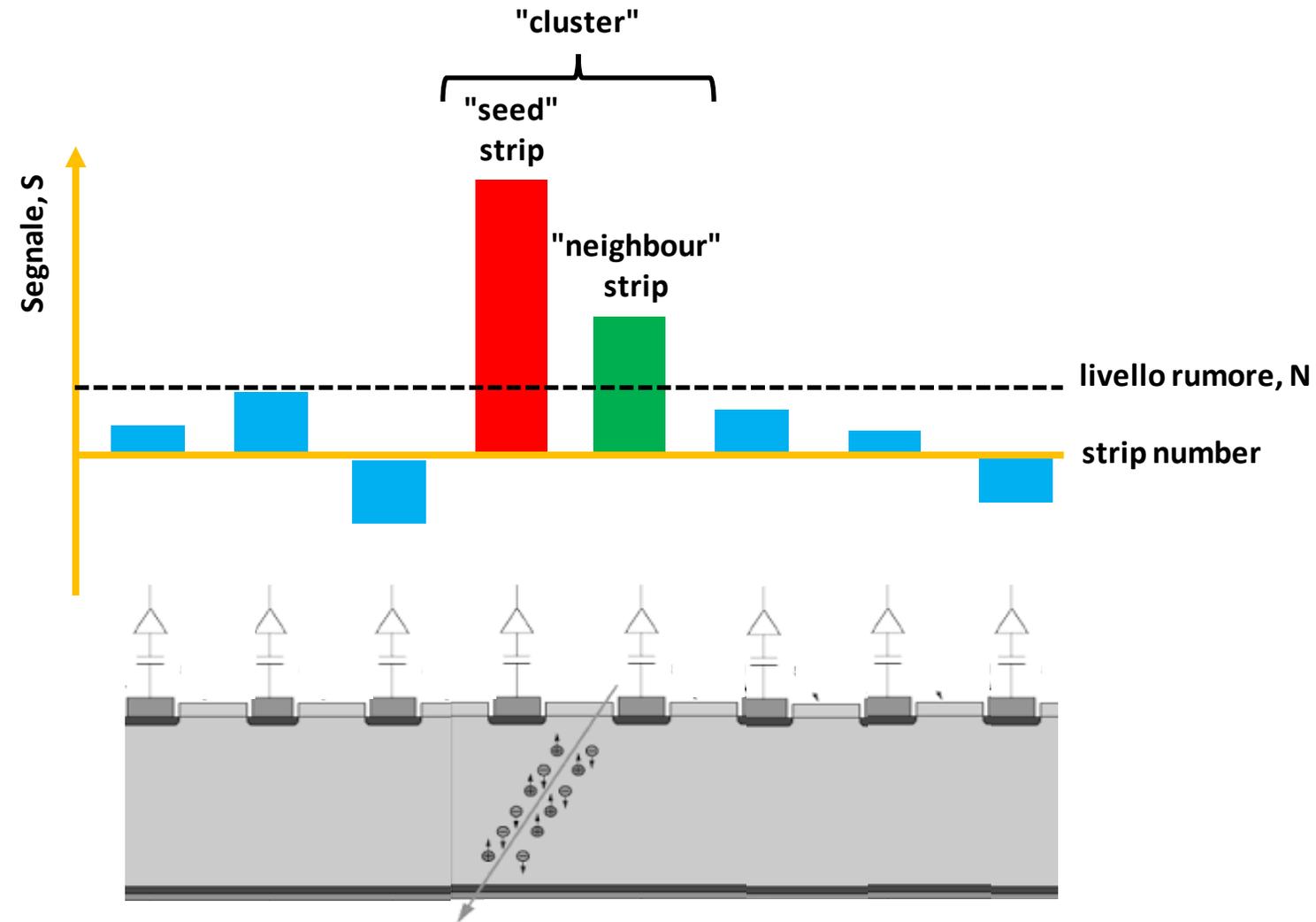
# FASI DELL'ANALISI DEI DATI

- "calibrazione": calcolo dei piedestalli , del rumore e la sottrazione del common noise;

# FASI DELL'ANALISI DEI DATI

- "calibrazione": calcolo dei piedestalli, del rumore e la sottrazione del common noise;
- "clusterizzazione": identificazione del "cluster" sulle strip che presentano un segnale viene fatta valutando il segnale di ciascuna strip, considerando il rapporto tra il segnale e il rumore della strip;

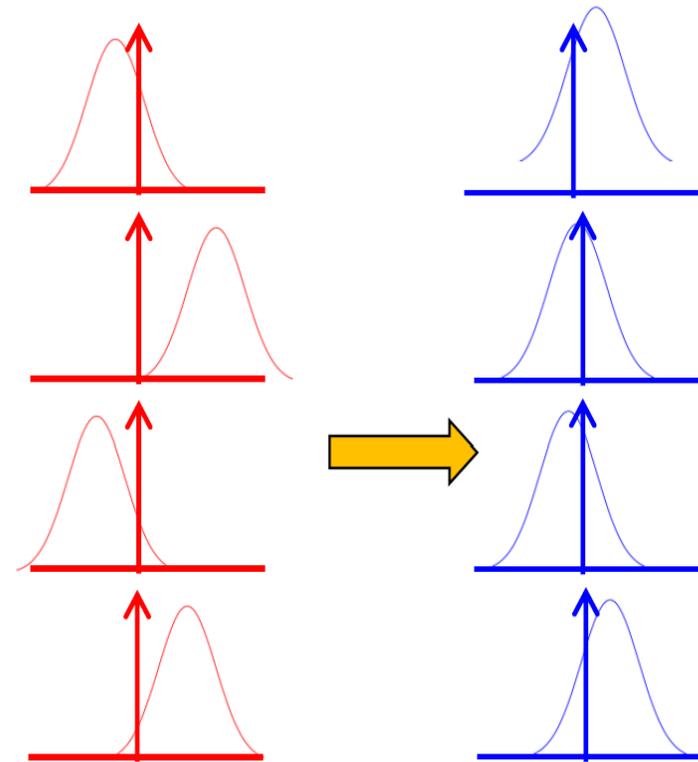
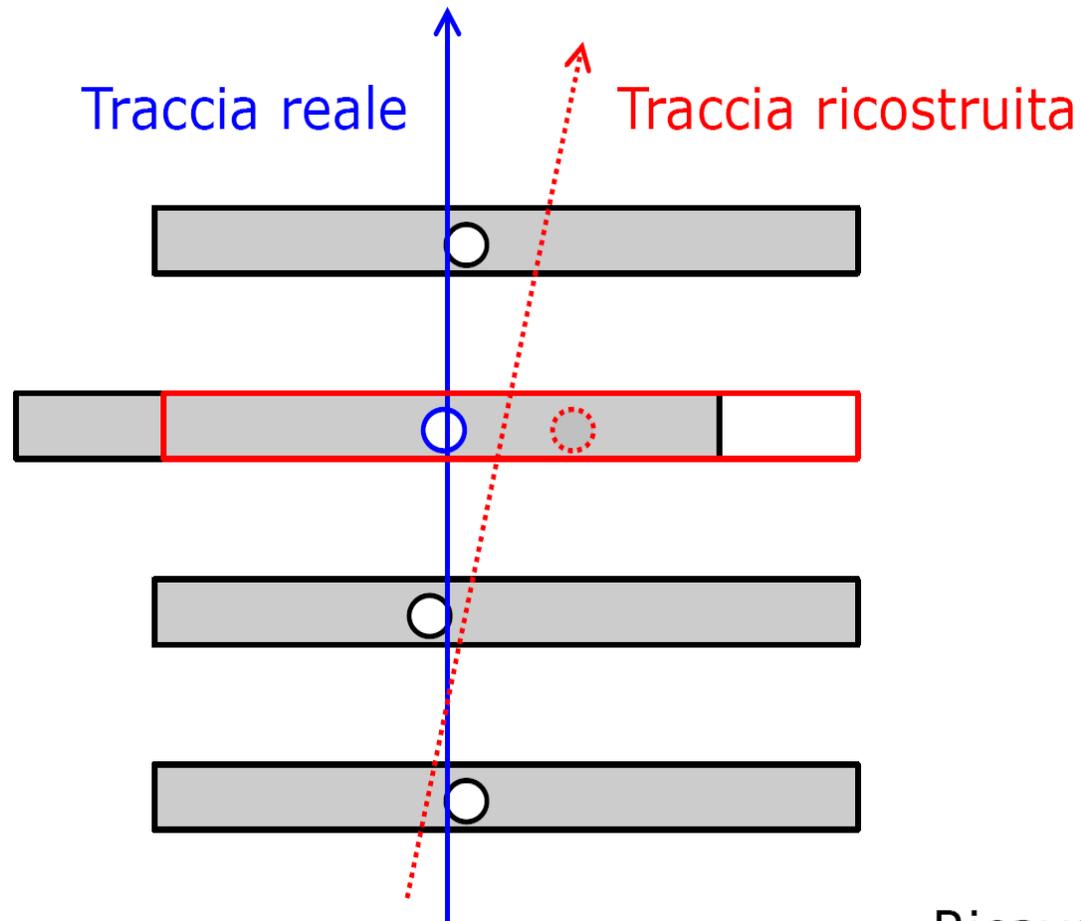
# IDENTIFICAZIONE DEL CLUSTER



# FASI DELL'ANALISI DEI DATI

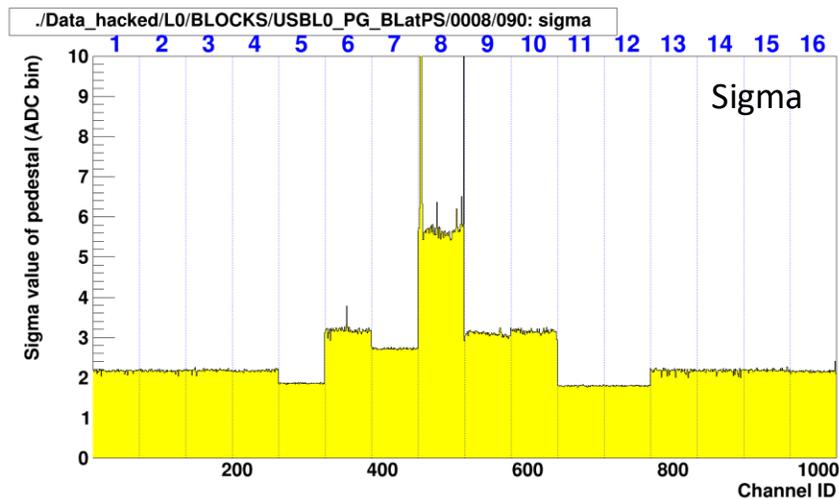
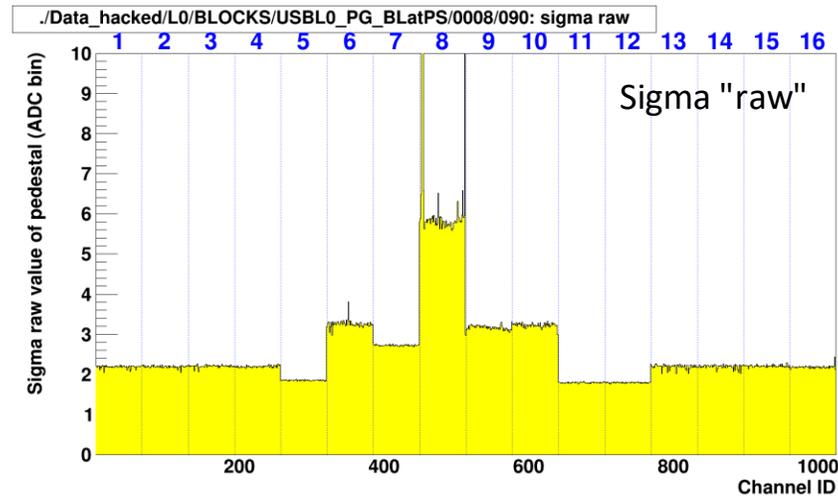
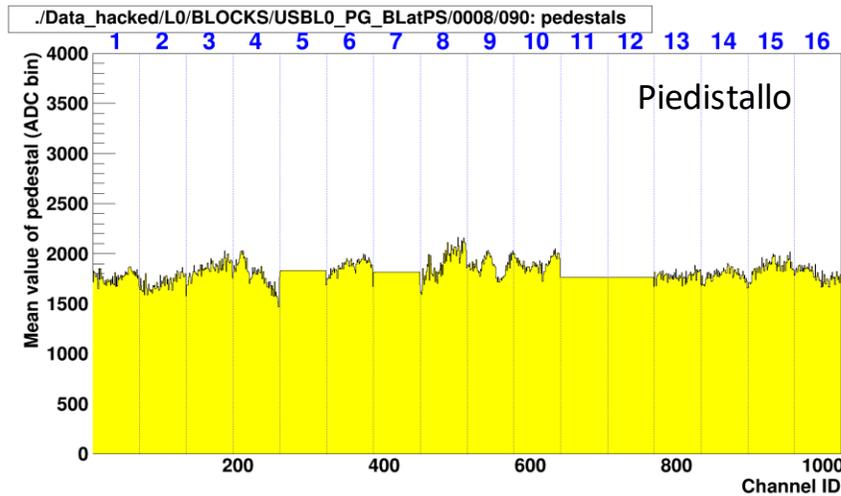
- "calibrazione": calcolo dei piedestalli , del rumore e la sottrazione del common noise;
- "clusterizzazione": identificazione del "cluster" sulle strip che presentano un segnale viene fatta valutando il segnale di ciascuna strip, considerando il rapporto tra il segnale e il rumore della strip;
- "allineamento": conversione delle posizioni *locali* (i.e. nel riferimento del singolo rivelatore) in *assolute* (i.e. nel sistema del laboratorio), avendo determinato la posizione assoluta di ciascun rivelatore rispetto agli altri tramite tracce reali di particelle;

# L'ALLINEAMENTO DEI TRACCIATORI

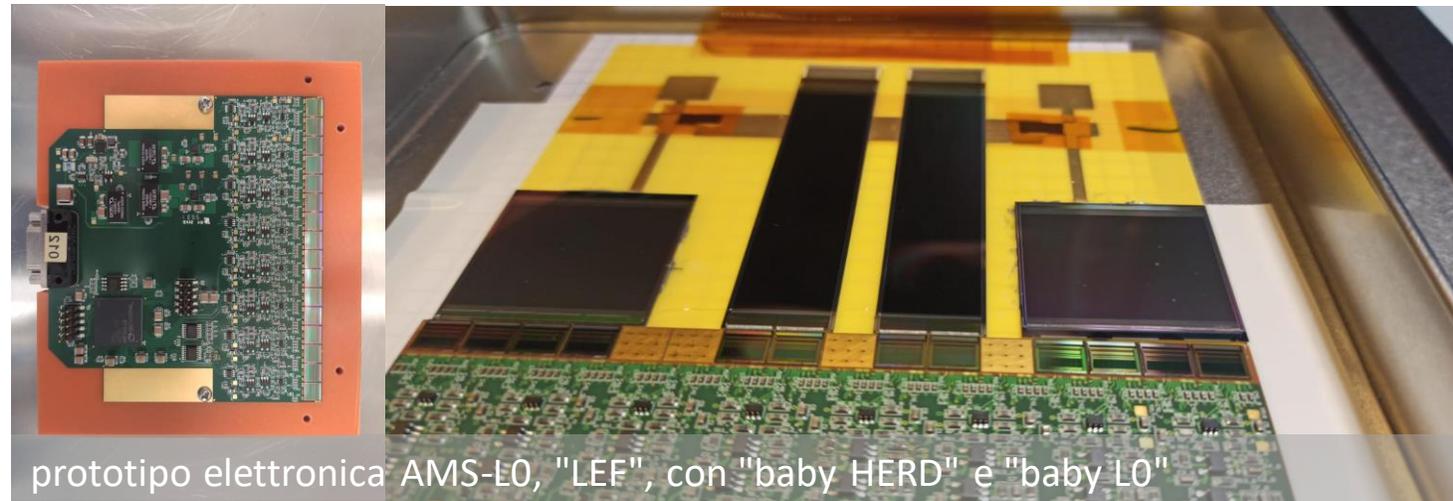


Ricavo parametri di allineamento dai residui (=misura - posizione della traccia)

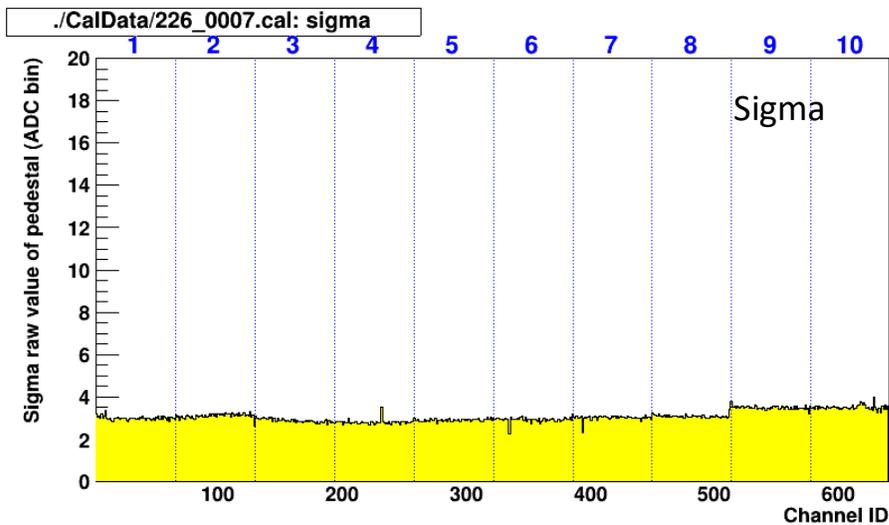
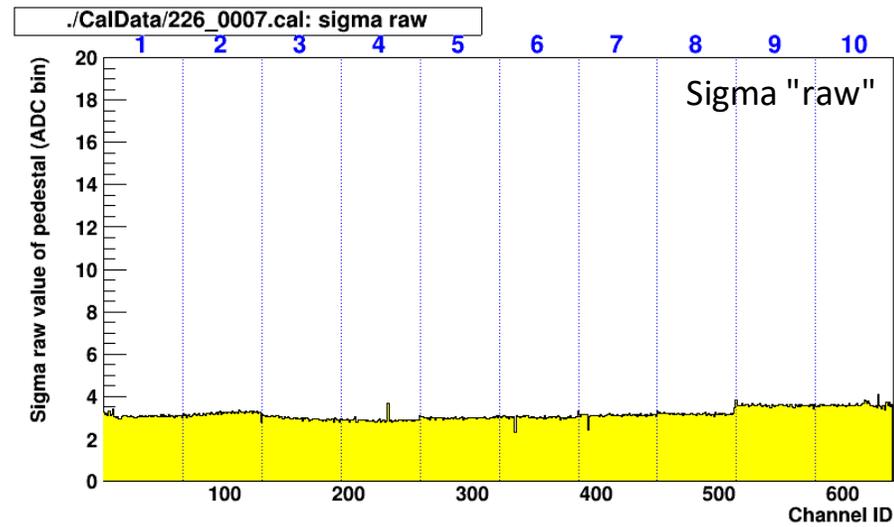
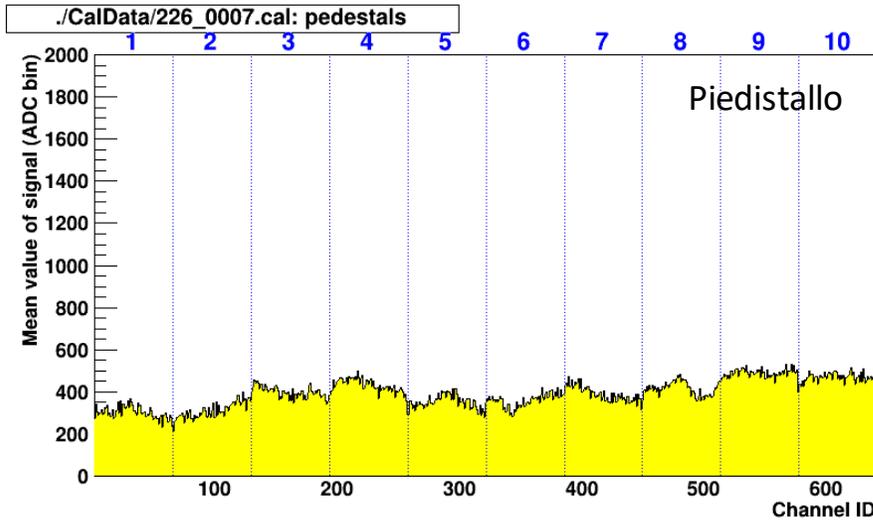
# CALIBRAZIONE AMS-L0 / baby HERD



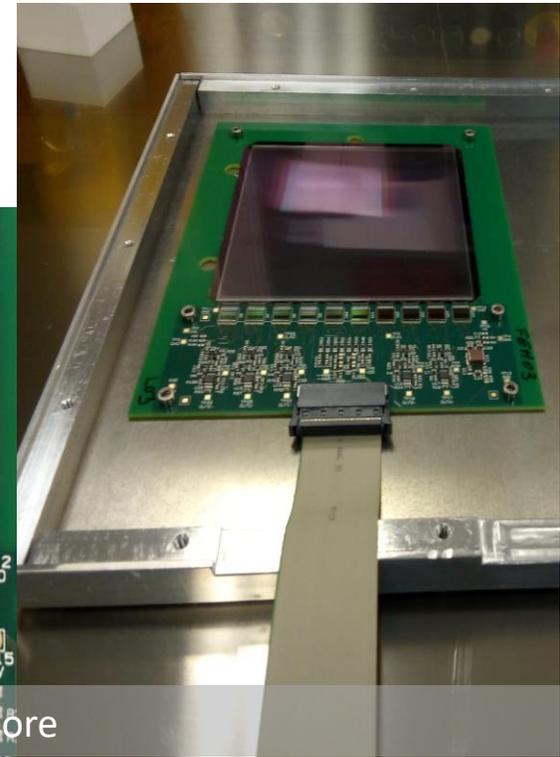
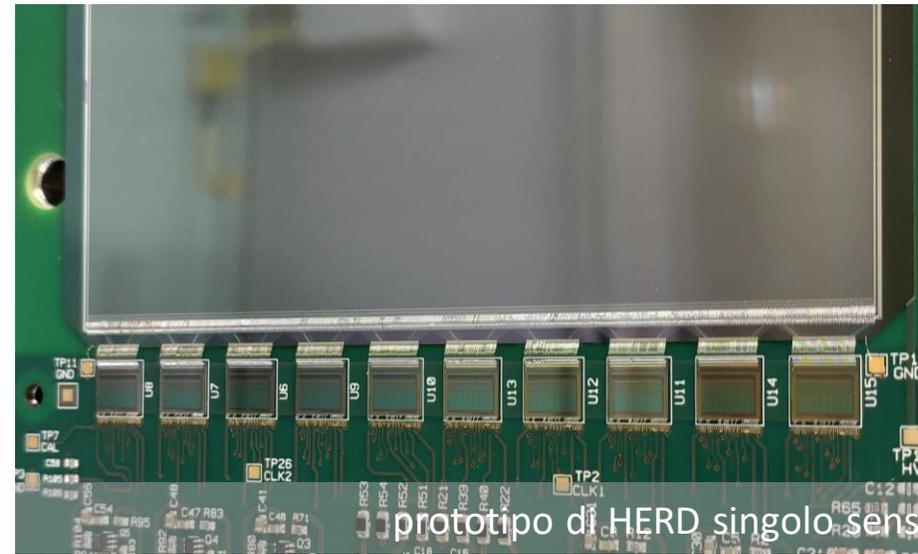
- ADC a 14 bit
- prototipo elettronica AMS-L0, "LEF"
- 2 silici quadrati, "baby HERD", 100 (50)  $\mu\text{m}$  di lettura (impianto)
- 2 silici "baby L0" (stessa lunghezza di quelli previsti per il volo)", 110 (27.5)  $\mu\text{m}$  di lettura (impianto)
- bonding incrociato su 7° e 8° VA



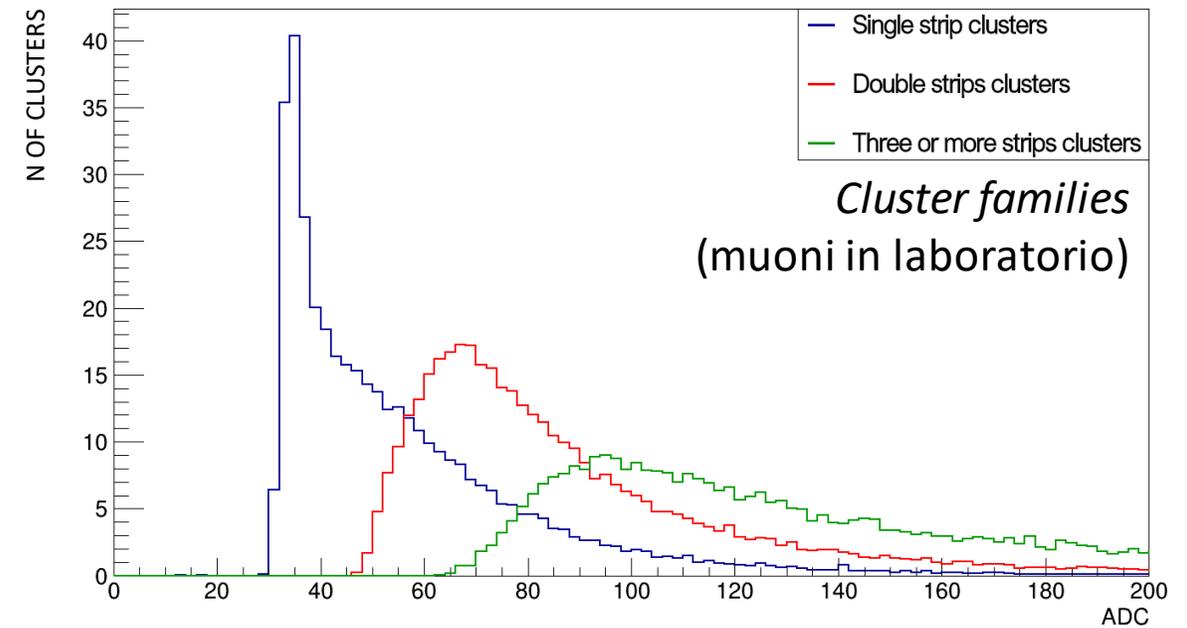
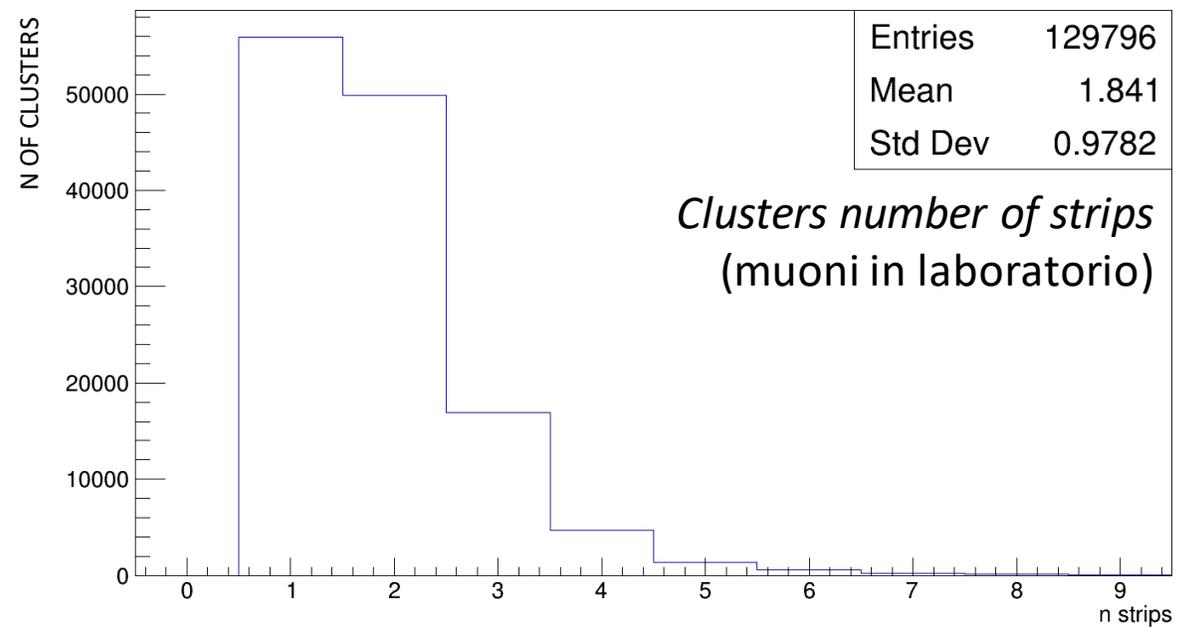
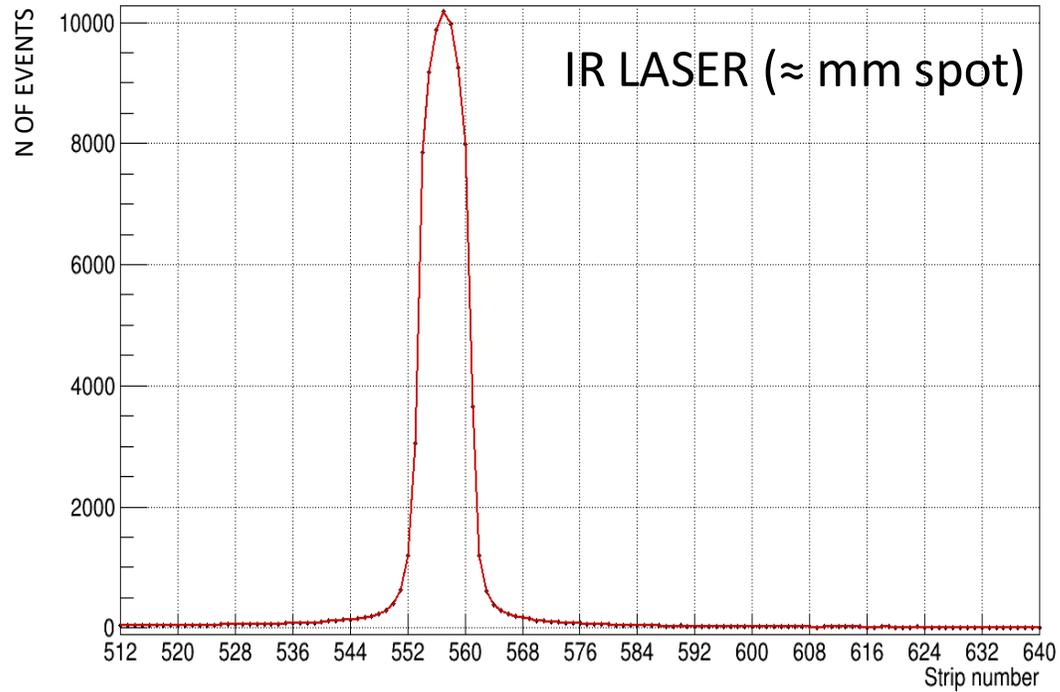
# CALIBRAZIONE HERD



- ADC a 12 bit
- elettronica prototipo di HERD
- 1 silicio quadrato, "HERD", 150 (50)  $\mu\text{m}$  di lettura (impianto)



# SEGNALE AMS-LO ?



# I CORSI SEGUITI NEL PRIMO ANNO

- Uncertainty and Probability
- EFT - Theory
- Nanosystems\*
- EFT – Spintronic
- Multimessenger\*
- EFT III – HEP
- Introduction to Space Physics
- Physics at colliders
- Flavour Physics
- Teaching and Learning Physics\*

\* esami sostenuti

Grazie dell'attenzione