

**IFAE2017,**  
**Trieste,**  
**19 Aprile 2017**



**The CALorimetric Electron Telescope (CALET) space experiment for the direct measurement of high energy electrons in cosmic rays.**

**Lorenzo Pacini (Università degli studi di Firenze, CNR - IFAC, INFN Firenze)**

# CALET: introduzione



- Il “CALorimetric Electron Telescope” (CALET) è una missione spaziale approvata da JAXA (Japanese AeroSpace Agency), da ASI (Italian Space Agency) e dalla NASA.
- Il lancio verso la stazione spaziale è avvenuto il 19 Agosto 2015.
- Obiettivi principali di CALET:
  - ▶ la misura dello spettro di elettroni fino al TeV ed esplorazione della regione multi-TeV,
  - ▶ la misura degli spettri dei nuclei (dal protone fino al Ferro) fino a centinaia di TeV,
  - ▶ la misura di gamma ad alte energie con buona risoluzione angolare ed energetica.
- Misure cruciali per:
  - ▶ la comprensione della propagazione ed accelerazione dei raggi cosmici,
  - ▶ ricerca di sorgenti vicine di alta energia.

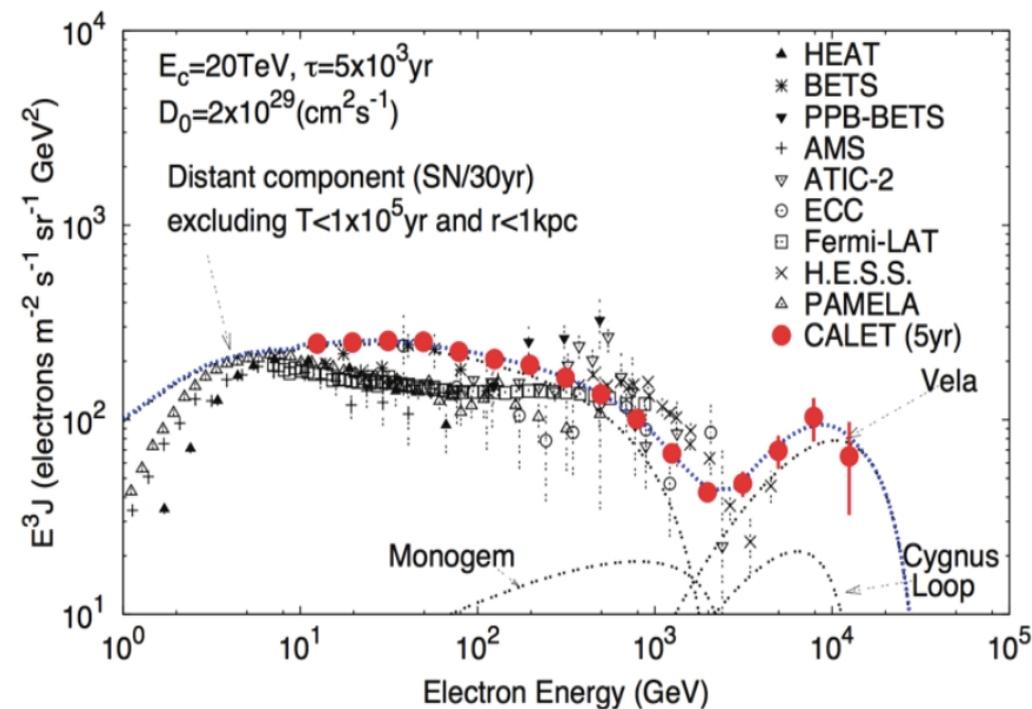
# Fisica degli elettroni cosmici



- Raggi cosmici galattici -> accelerati nei resti di supernova (SNR).
- Diffusione di elettroni di alta energia: perdita di energia (sincrotrone e Compton inverso).
- Elettroni al TeV: raggiungono la terra solo se originati da sorgenti vicine ( $10^5$  anni).

*Previsione della misura dello spettro di elettroni con CALET in 5 anni:*

*T. Kobayashi et al., Ap.J. 601 (2004) 340.*

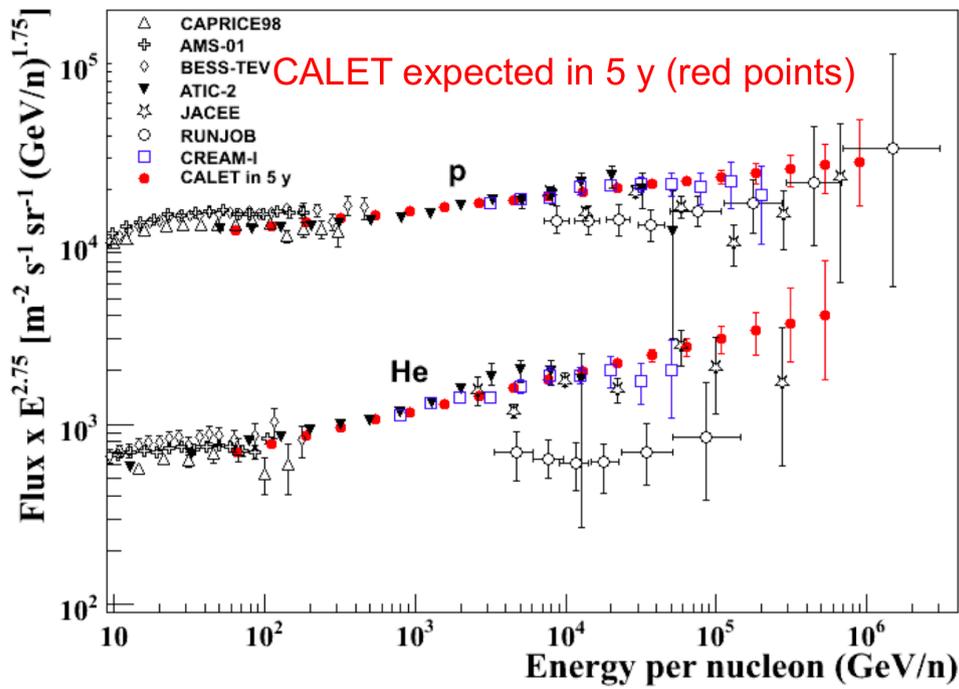


# Fisica dei nuclei cosmici.



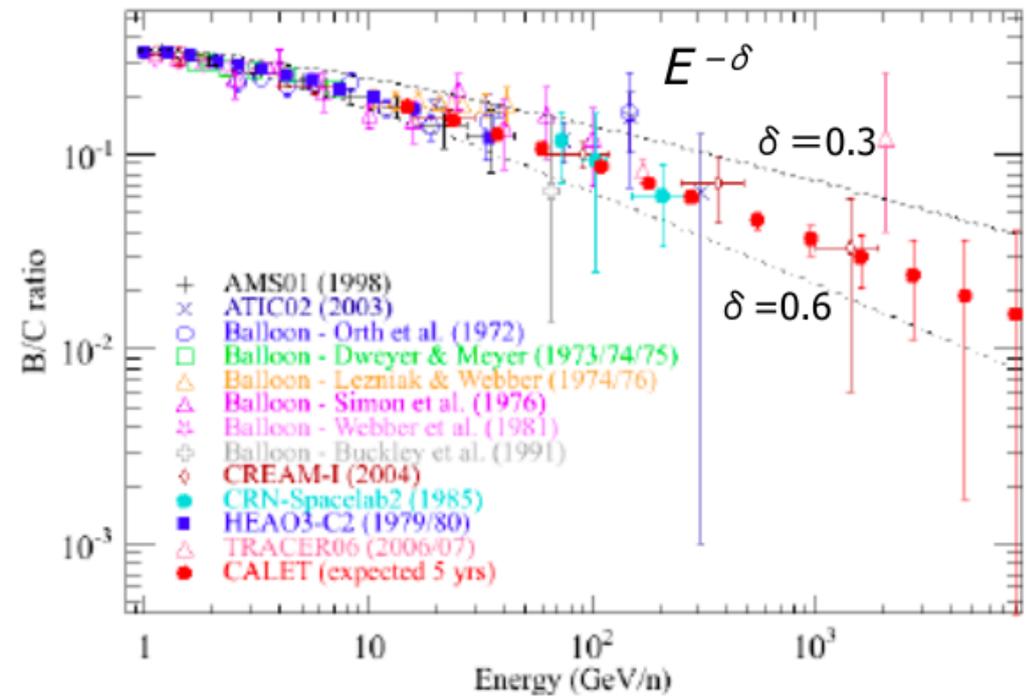
## Protone ed elio:

- ▶ hardening a  $\sim 200$  GeV,
- ▶ cut-off spettrale  $E > 100$  TeV.



## Rapporto Boro/Carbonio:

- ▶ modelli di propagazione,
- ▶ estensione dello spettro ad alte energie.





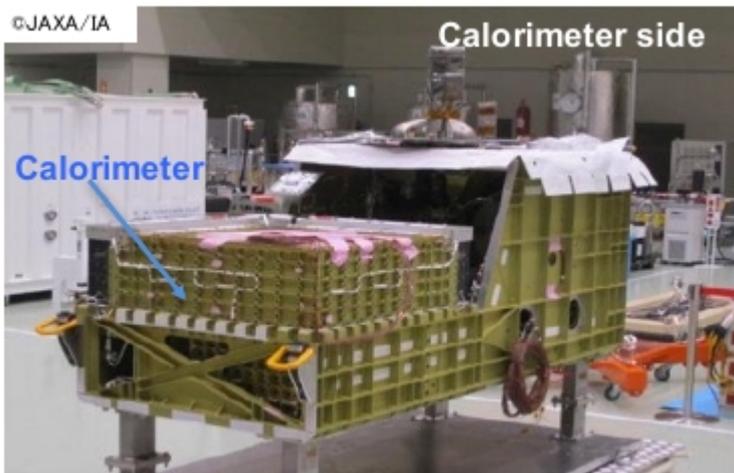
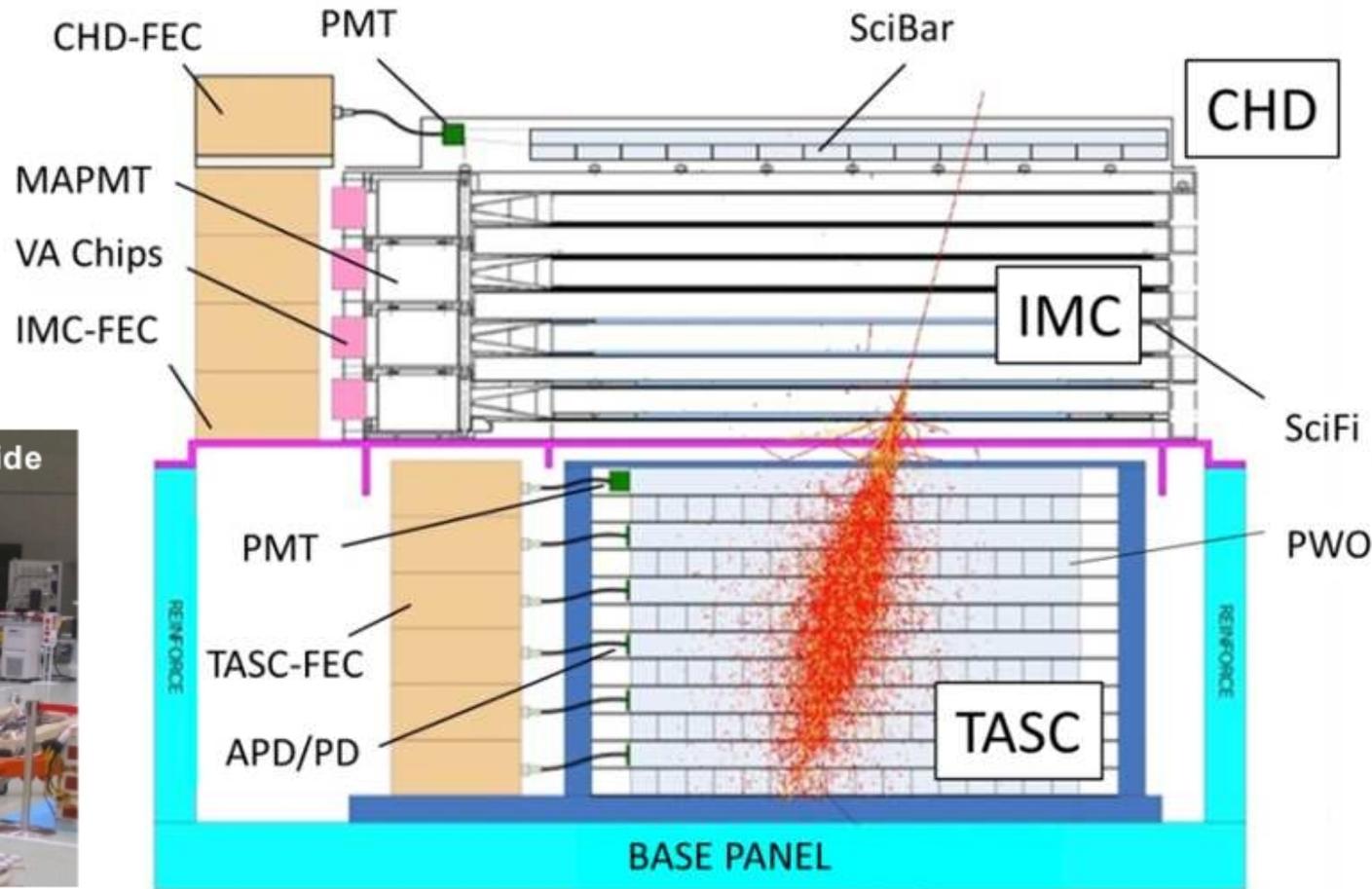
# Lo strumento

# Il calorimetro



Lo strumento principale è composto da un “Total AbSorption Calorimeter” (TASC) omogeneo, un “IMaging Calorimeter” (IMC) finemente segmentato, e un “CHarge Detector” (CHD)

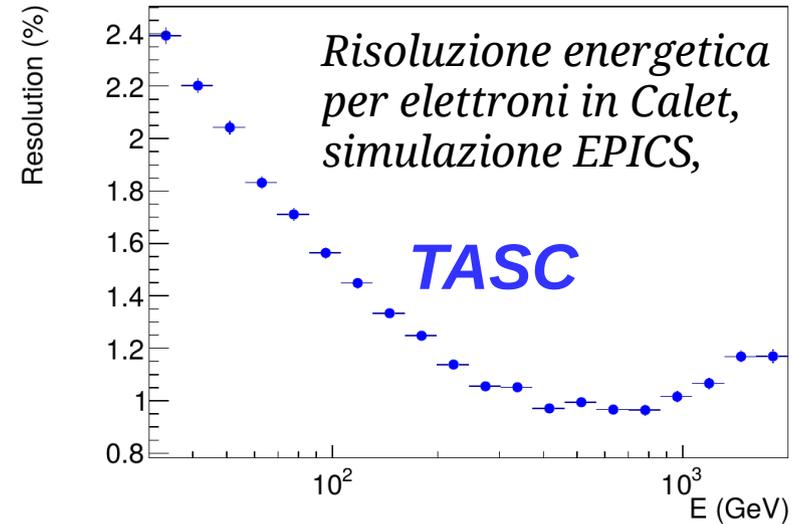
**Gli alimentatori di alta tensione sono stati sviluppati dal IFAC-CNR a Firenze.**



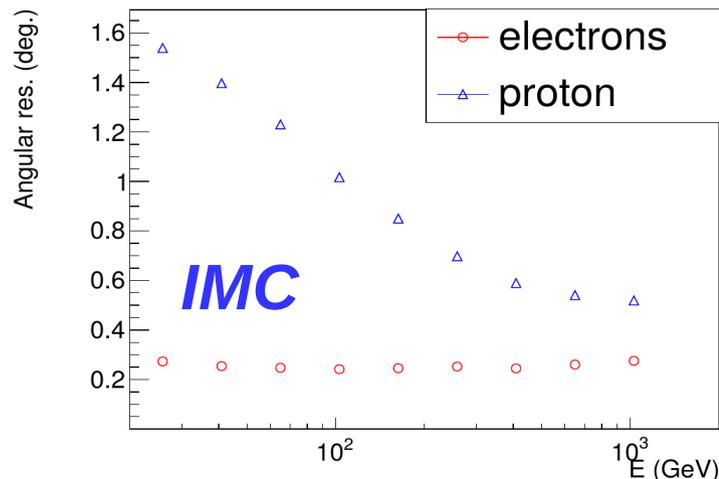
# TASC e IMC



- TASC: omogeneo con barre di PWO ( $27 X_0$ ).
- Lettura della luce di scintillazione:
  - ▶ primo piano  $\leftrightarrow$  PMT,
  - ▶ APD/PD per gli altri piani,
  - ▶ elettronica di front-end con doppio guadagno.



## *Risoluzione angolare, simulazione EPICS*

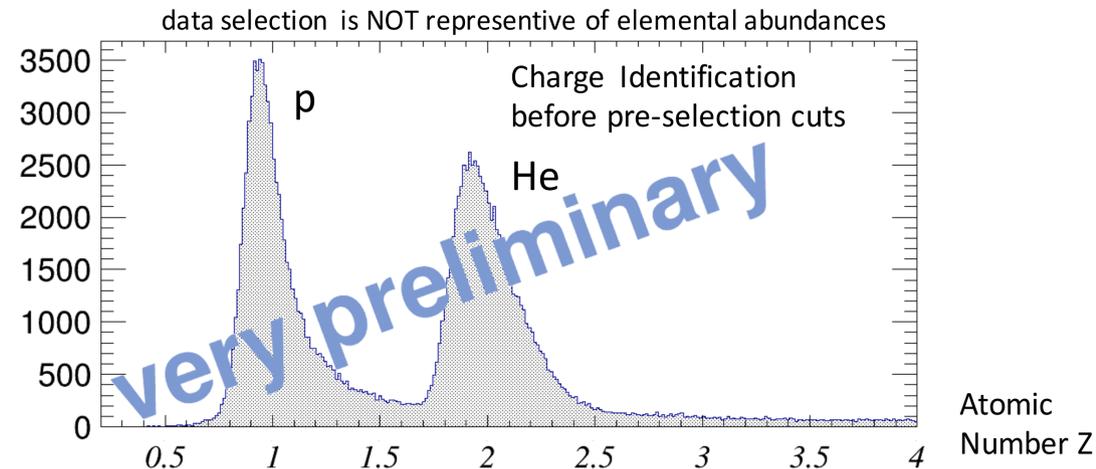


- ◆ IMC: 16 piani di fibre scintillanti
- ◆ 7 piani di tungsteno (spessore totale:  $3 X_0$ ).
- ◆ Lettura tramite PMT multi-anodo con 64 canali.

# CHD e CGRB



- CHD: due piani (X e Y) segmentati, barre di scintillatore plastico.
- Lettura con PMT.
- Alto campo dinamico (misura di nuclei oltre il Ferro).



- “Calet Gamma Ray Burst Monitor” (CGBM) composto da 3 rivelatori scintillanti:
  - ▶ 1 “Hard X-ray Monitor” (HXM): sensibilità tra 7 keV e 1 MeV, materiale attivo  $\text{LaBr}_3$ ,
  - ▶ 2 “Soft Gamma-ray Monitor” (SGM): sensibilità tra 100 keV e 20 MeV, BGO.
- Osservazione simultanea di GRB con fotoni di alta energia nel calorimetro.



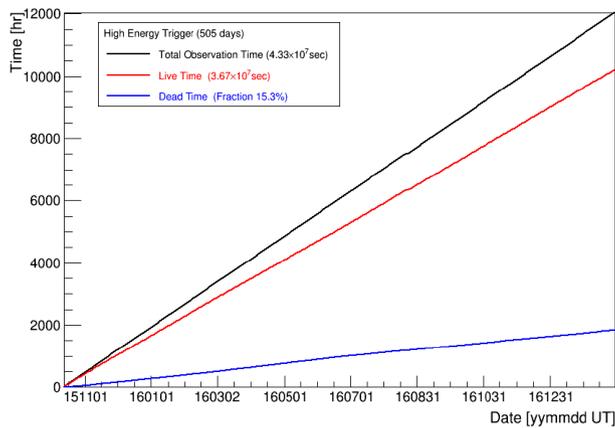
# Stato delle operazioni e articoli pubblicati.

# Stato delle operazioni

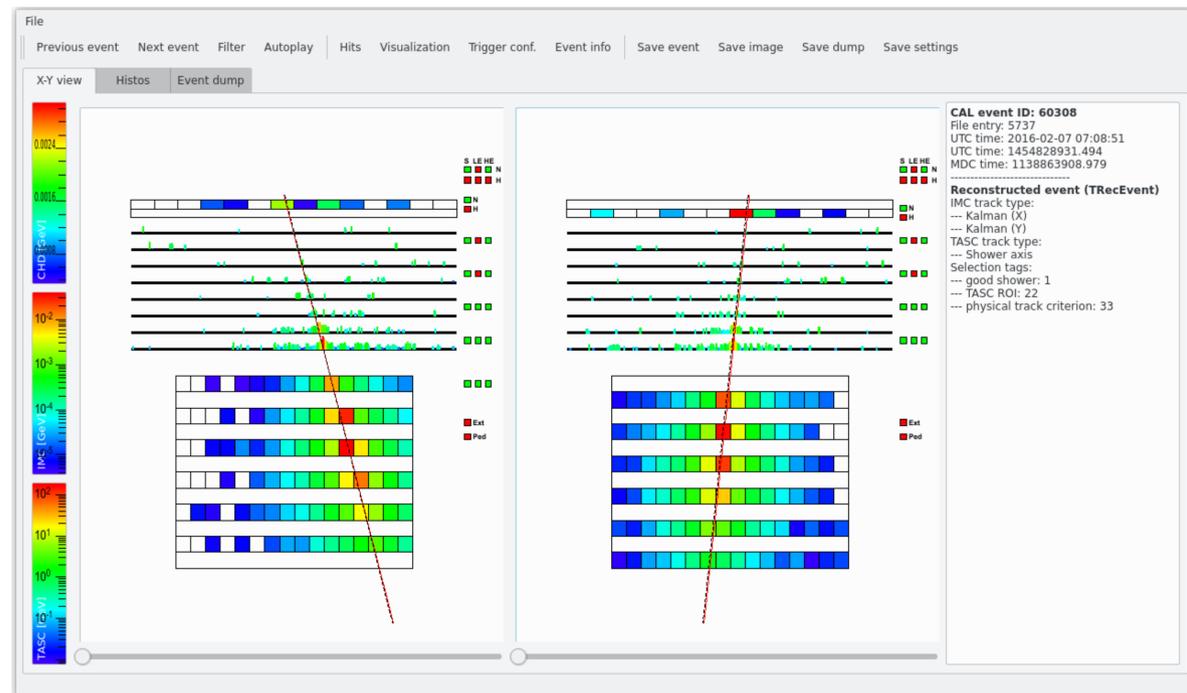


- Apparato in presa dati continua da ottobre 2015.
- Frazione di tempo vivo in modalità High Energy Trigger (HET) ~ 80 %

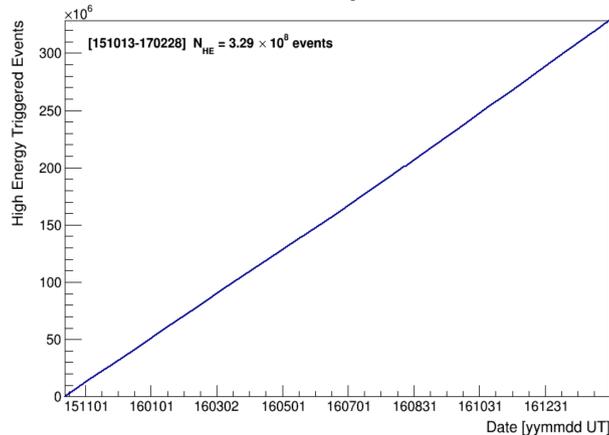
Tempo vivo complessivo



Evento candidato elettrone a ~ 1 TeV



Numero di eventi acquisiti in modalità HET



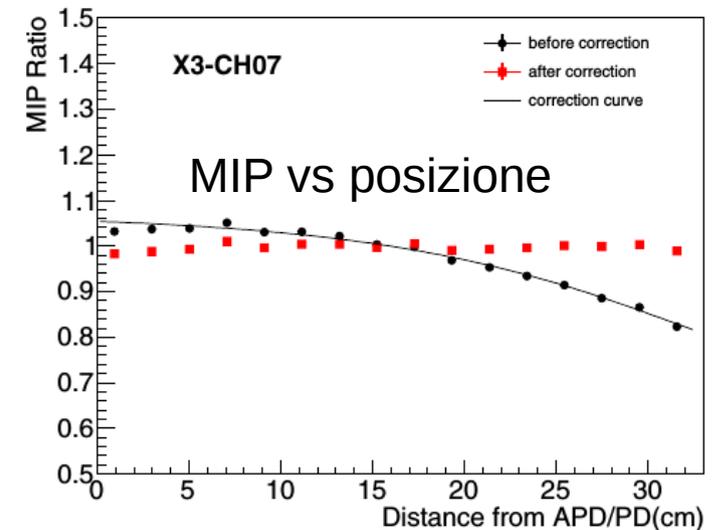
# Calibrazione del TASC



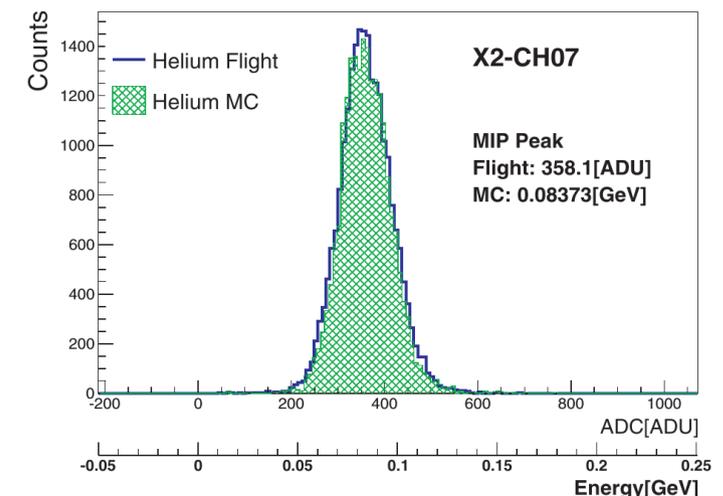
Publicazione: <http://dx.doi.org/10.1016/j.astropartphys.2017.03.002>

## Calibrazione in 3 passi:

- 1) Conversione ADC  $\rightarrow$  MIP:
  - ▶ misura in orbita con protoni ed elio,
  - ▶ correzione per posizione e temperatura.
- 2) Verifica della linearità nei 4 campi dinamici
  - ▶ misura a terra con UV laser.
- 3) calibrazione estesa ai campi dinamici superiori:
  - ▶ misura in orbita con sciame energetici,
  - ▶ sfrutta la sovrapposizione tra range adiacenti.



## MIP in MC e dati di volo



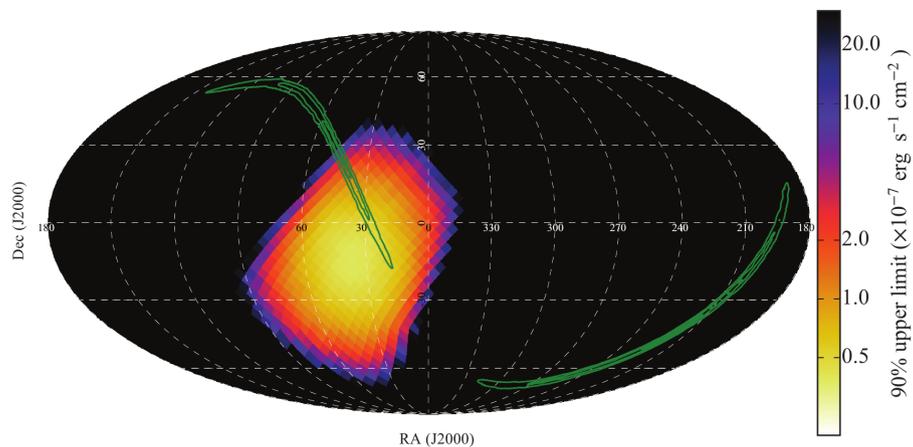
# GW 151226 controparte



Publicazione (APJ): <https://arxiv.org/abs/1607.00233v2>

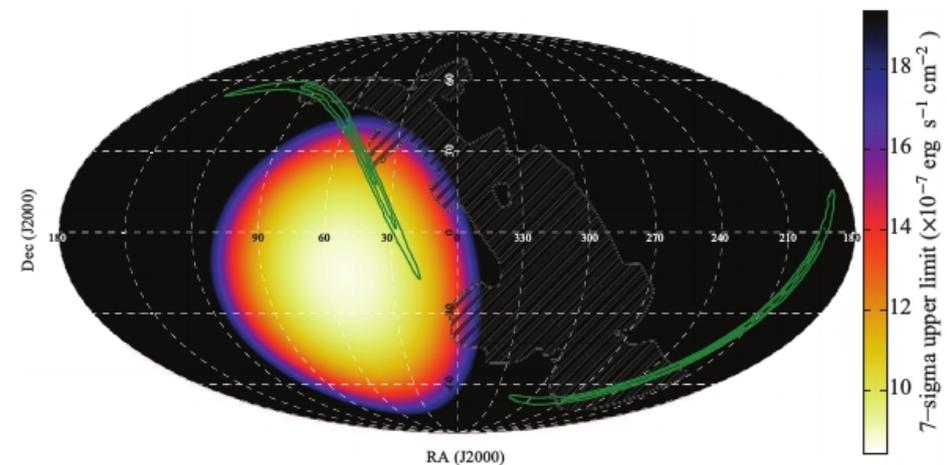
- GW 151226: seconda onda gravitazionale misurata da LIGO.
- CGBM: nessun trigger di GRB trovato in corrispondenza di GW 151226.
- Calorimetro: nessun candidato fotone trovato (selezioni: “Mori, M., ICRC 2013”).

Limite superiore per fotoni nel calorimetro



*Area efficace: simulazione EPICS*

Limite superiore per GRB in HXM



*Simulazione GEANT4, spettro tipico di BATSE short-GRB.*



# Identificazione di elettroni

# Reiezione p/e

● Analisi standard, utile per gli studi preliminari sugli elettroni.

★ **RE** ↔ Larghezza dello sciame nel TASC

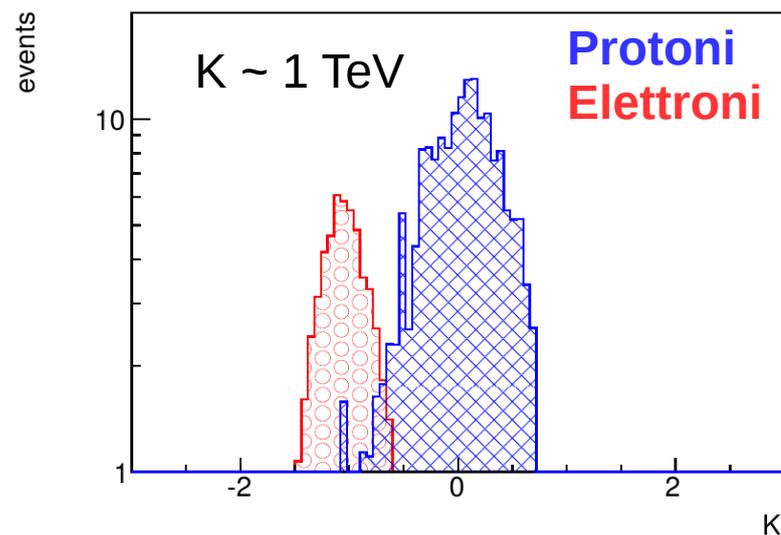
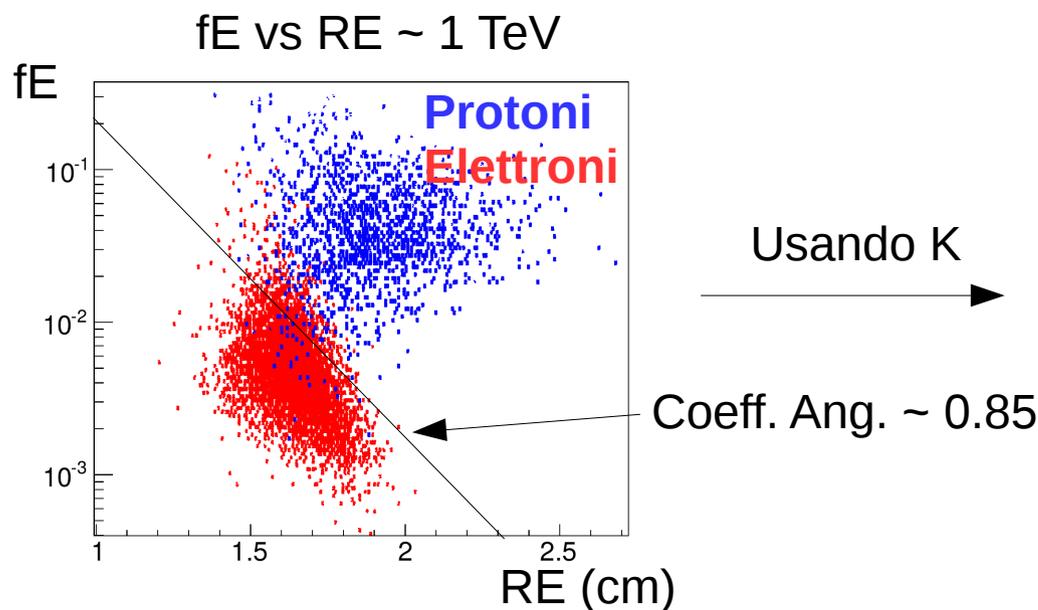
★ **fE** ↔ frazione di energia depositata nell'ultimo piano del TASC

★ **K = log<sub>10</sub>(fE) + 0.85·RE**

$$R_i = \sqrt{\frac{\sum_j \{ \Delta E_{i,j} \times (x_j - x_c)^2 \}}{\sum_j \Delta E_{i,j}}}$$

$x_c$  : shower axis center

$\Delta E_{i,j}$ :  $\Delta E$  at i-th layer, j-th PWO

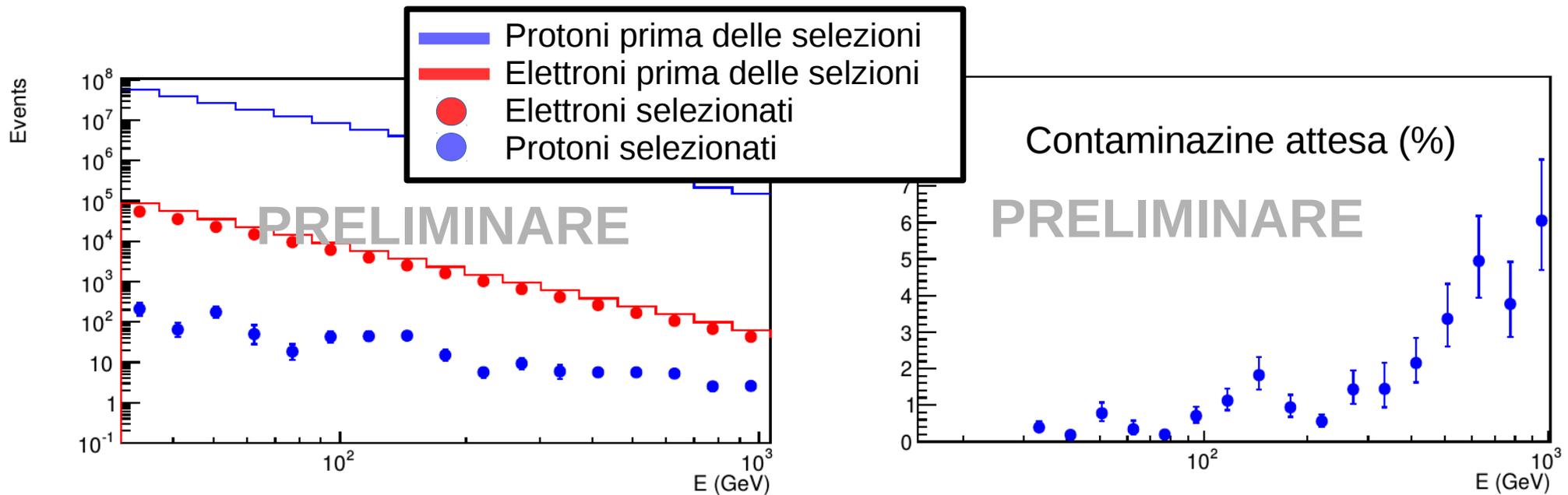


# Contaminazione, EPICS



● Contaminazione attesa con simulazioni MC basate su EPICS:

- ▶ flusso di protoni di elettroni simulato in accordo con i flussi misurati da AMS,
- ▶ Simulazioni includono: rumore, soglie di trigger, ecc...

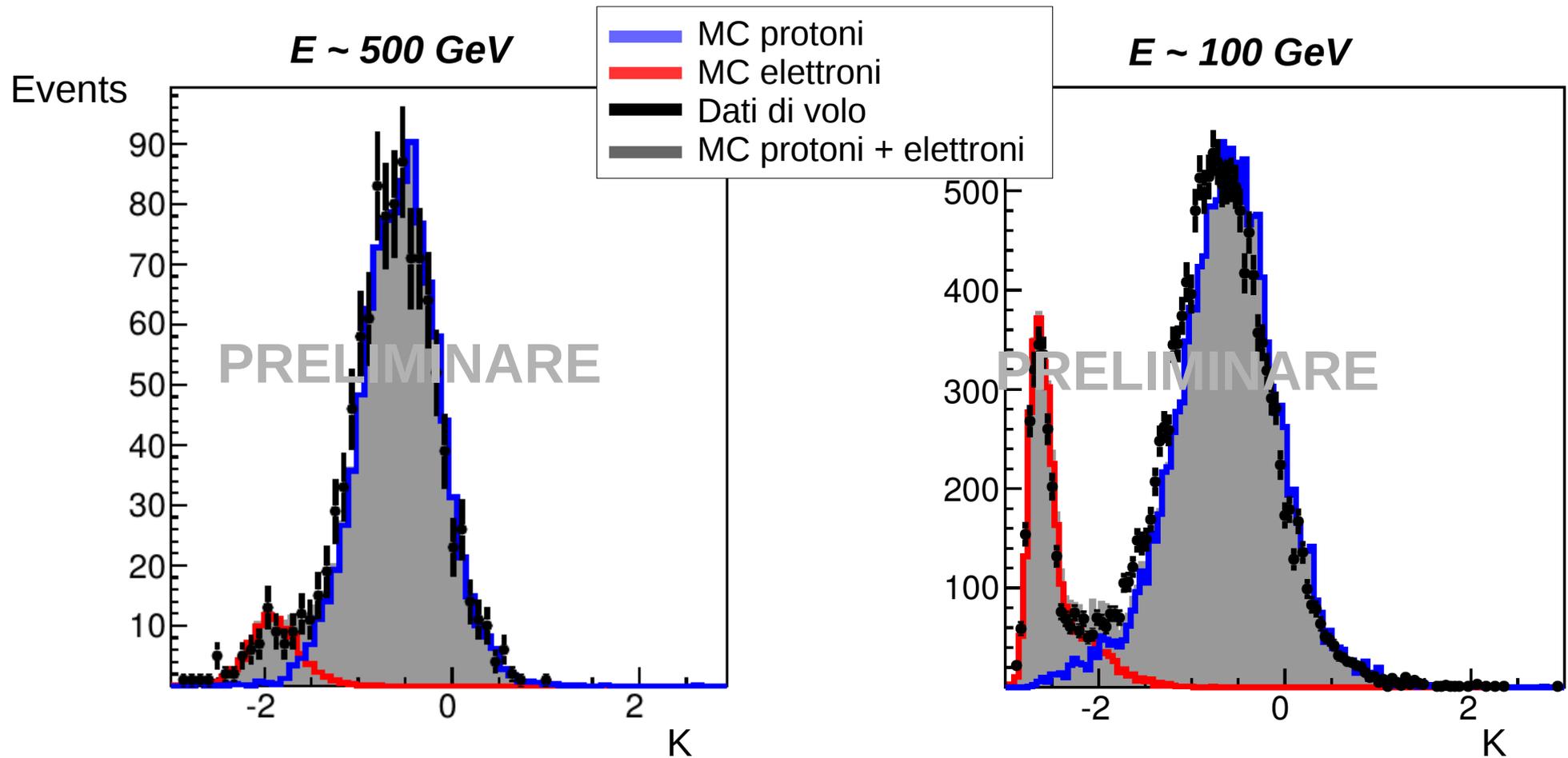


**Contaminazione residua:**  $\leq 6\%$  per  $E < 1$  TeV

# Confronto dati - MC



- Confronti tra dati di volo e Monte Carlo basato su EPICS.



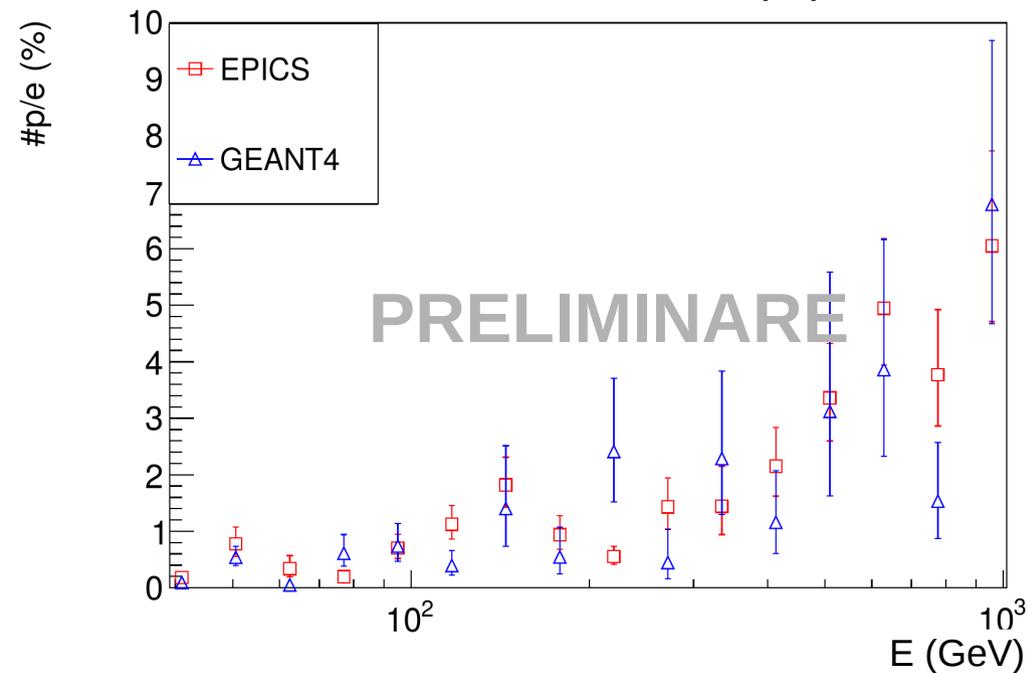
- Valutazione del sistematico dovuto a discrepanze dati - MC in corso.

# Nuova simulazione: GEANT4

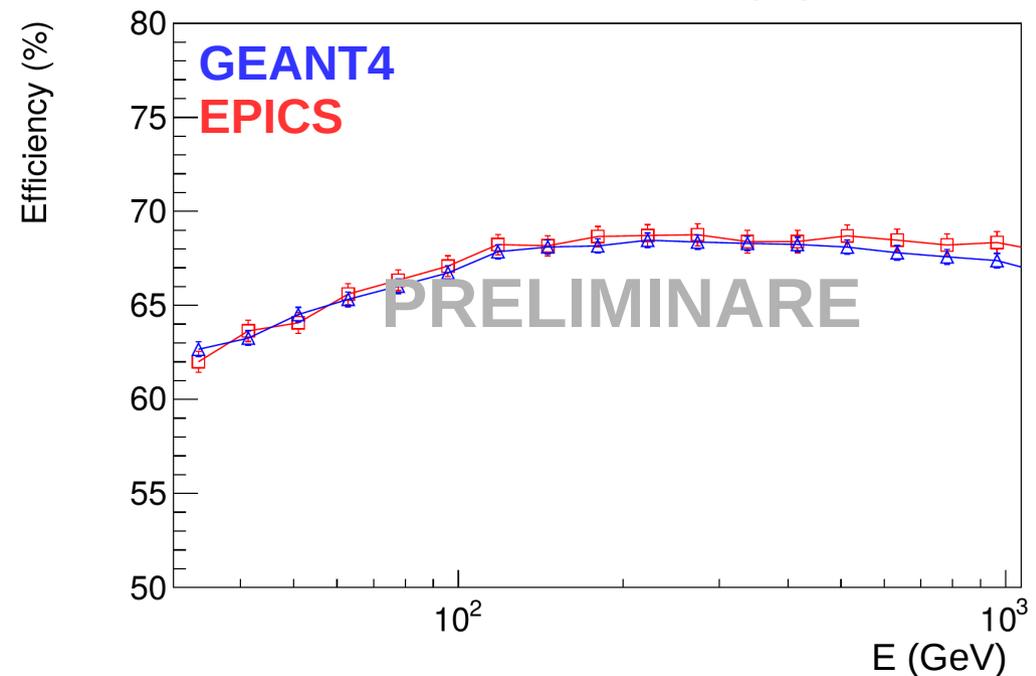


- Una nuova simulazione basata su GEANT4 è stata realizzata.
- Elettroni e protoni simulati come in EPICS (statistica limitata per adesso).

Contaminazione attesa (%)



Efficienza di misura (%)



- Buon accordo tra i due MC indipendenti (differenze sotto studio al momento).
- Differenze dell'ordine del % nella misura degli elettroni per  $E < 1$  TeV.

# Riassunto



- L'esperimento CALET è in orbita ed operativo dall'ottobre del 2015.
- Le operazioni in orbita proseguono come previsto.
- La fase di calibrazione è stata conclusa con successo.  
(<http://dx.doi.org/10.1016/j.astropartphys.2017.03.0>)
- Nessuna controparte elettromagnetica (X-ray e gamma) identificata per la GW 151226.  
(<https://arxiv.org/abs/1607.00233v2>)
- Analisi degli elettroni in corso:
  - ▶ l'analisi standard sta venendo finalizzata per la misura di elettroni al di sotto del TeV,
  - ▶ confronto tra diversi Monte Carlo e dati di volo per la valutazione dei sistematici di misura,
  - ▶ tecniche di analisi complesse (MVA-BDT) sono in fase di sviluppo per aumentare la discriminazione nella regione  $E > \text{TeV}$ .

# Indice



- La fisica di CALET.
- Lo strumento.
- Stato delle operazioni.
- Articoli pubblicati:
  - ▶ calibrazione del calorimetro,
  - ▶ GW 151226 controparte elettromagnetica.
- Identificazione di elettroni in CALET:
  - ▶ simulazione EPICS,
  - ▶ confronto dati di volo e nuova simulazione GEANT4 (preliminare).

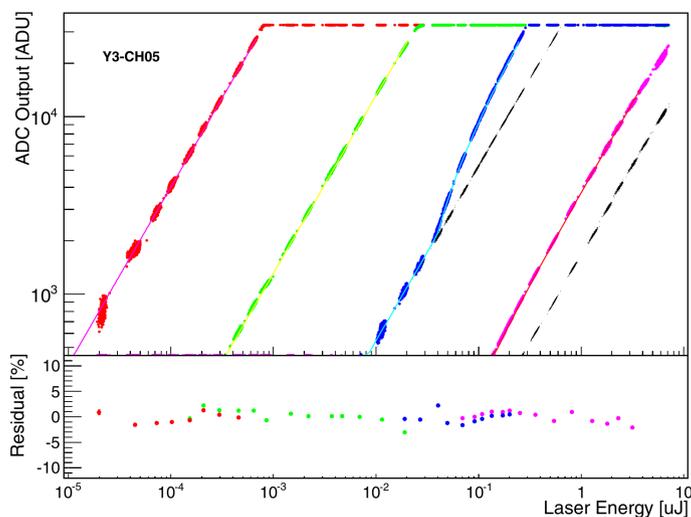
# Backup



# Calibrazione del TASC (2)

Publicazione: <http://dx.doi.org/10.1016/j.astropartphys.2017.03.002>

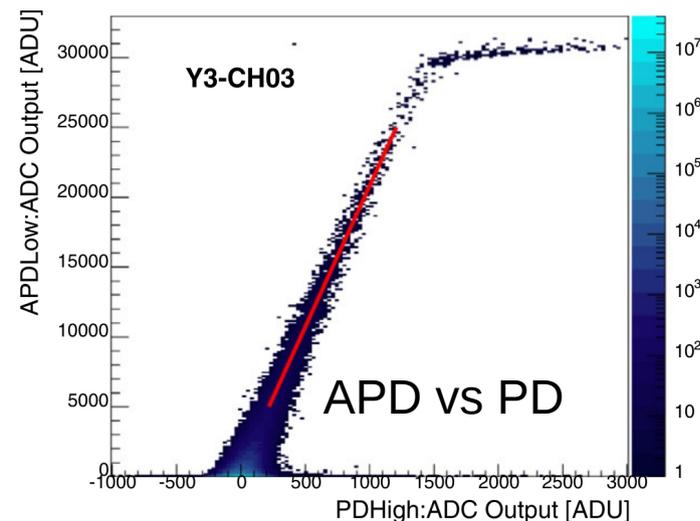
- Step 2: UV pulse laser → copertura dell'intero range dinamico



- ▶ E' presente crosstalk tra PD e APD.
- ▶ Saturazione dell'APD induce segnale sul PD.
- ▶ Correzione necessaria nel range 3, 4.
- ▶ Andamento ben riprodotto da una retta spezzata.

- Step 3: cross-calibrazione con sciami energetici.

- Si sfrutta la zona di sovrapposizione APD e PD.

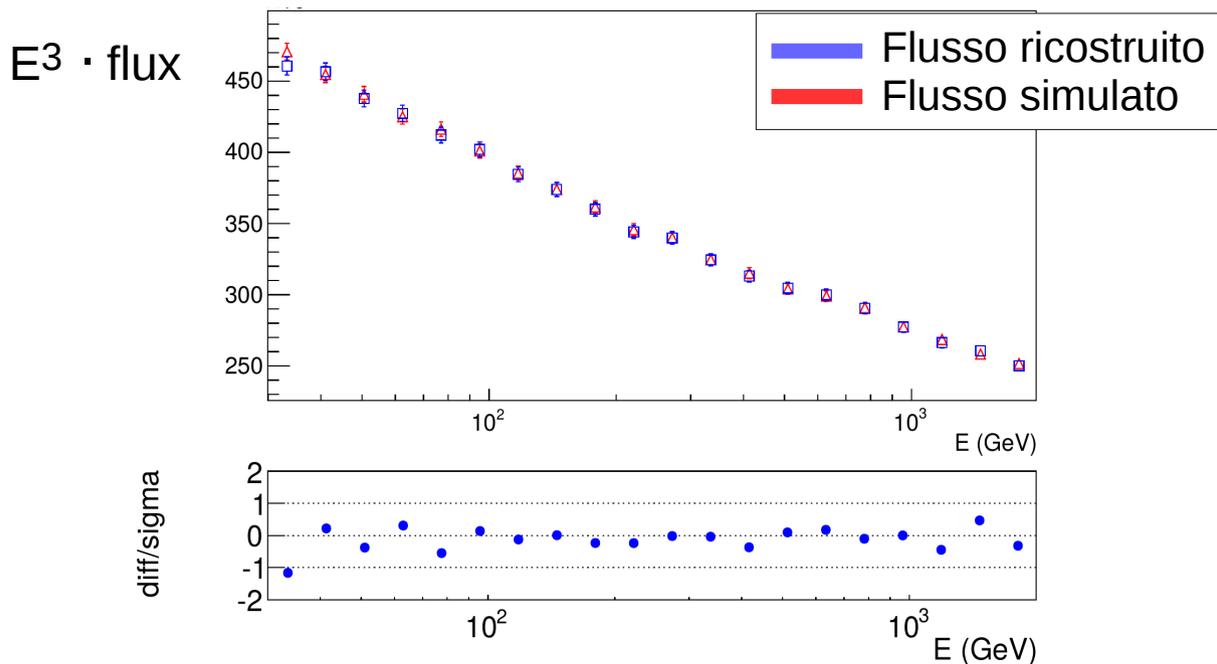


# Energia dell'elettrone

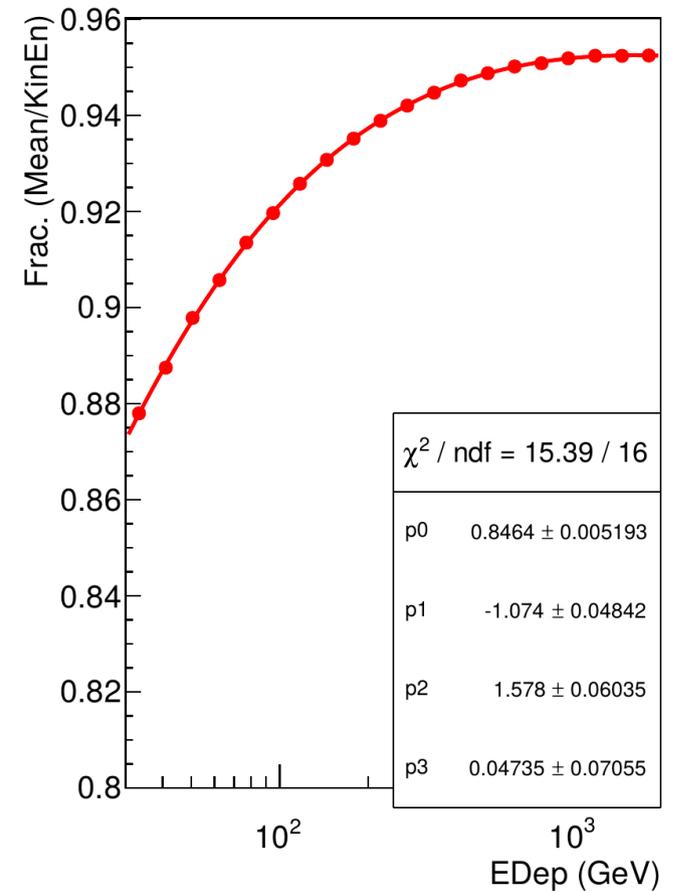


- Studio con simulazione EPICS.
- $f_{TASC}$  utilizzato per ricavare l'energia dell'  $e^-$
- Ottima risoluzione energetica.
- Unfolding non applicato per adesso.

## Test della ricostruzione in energia (EPICS)



## Frazione di energia nel TASC



$$f_{TASC} = p_0 - \frac{p_1}{\sqrt{E}} - \frac{p_2}{E}$$

# GW 151226 controparte



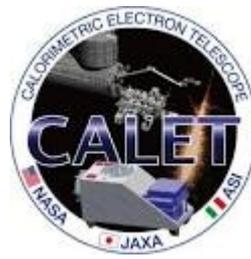
Pubblicazione (APJ): <https://arxiv.org/abs/1607.00233v2>

- GW 151226: seconda onda gravitazionale misurata da LIGO alle 3:38 (UT).
- CGBM: nessun trigger di GRB trovato in corrispondenza di GW 151226.
- Limite superiore → simulazione GENT4 con due modelli di emissione:
  - ▶ BATSE short-GRB (modello di emissione: “G. Ghirlanda et al., 2009, *A&A*, 496, 585”)
  - ▶ Crab-like (power-law: index of  $-2.1$ ).

## Limite superiore ( $7\sigma$ ) per osservazione di GRB

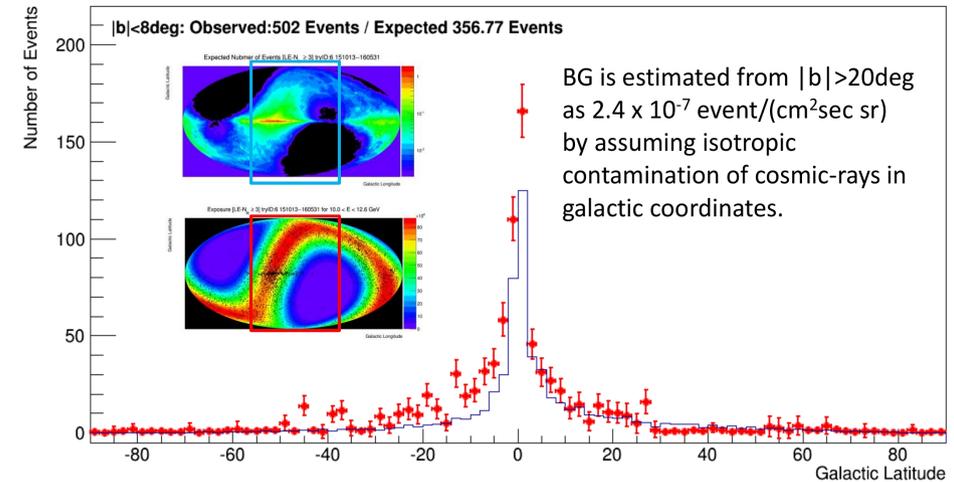
	HXM (7-500 keV; $30^\circ$ off-axis)	SGM (50-1000 keV; $45^\circ$ off-axis)
s-GRB	$1.0 \times 10^{-6} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$	$1.8 \times 10^{-6} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
Crab-like	$5.1 \times 10^{-7} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$	$1.4 \times 10^{-6} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

# GW 151226: gamma > 1GeV

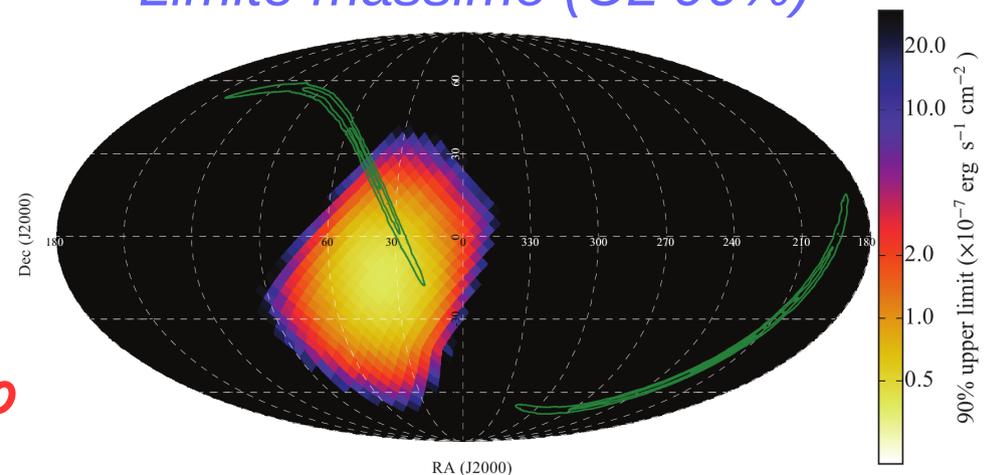


- Modalità “LowEnergyGamma” attiva per 15 s durante la GW.
- Selezione di gamma (“Mori, M., ICRC 2013”):
  - ▶ segnale massimo nel CHD < 0.5 MIP,
  - ▶ numero di punti utilizzati dal tracking 2,
  - ▶ accettazione ristretta (CHD-top, TASC-bottom).
- Area efficace: stimato simulazione EPICS .
- Conferma della simulazione con radiazione gamma diffusa.

## Gamma diffusi misurati da Calet



## Limite massimo (CL 90%)



*Nessun evento gamma trovato*