



MISURA DELLO SPETTRO DELLA COMPONENTE LEGGERA (P+HE) DEI RAGGI COSMICI  
NELL'INTERVALLO DI ENERGIA 3-3000 TeV CON L'ESPERIMENTO ARGO-YBJ.

**PAOLO MONTINI** *per la collaborazione ARGO-YBJ*

**INFN - ROMA TOR VERGATA**

**IFAE 2015**

Roma 8-10 aprile 2015

**IFAE**

INCONTRI DI FISICA  
DELLE ALTE ENERGIE

**2015**

# RAGGI COSMICI

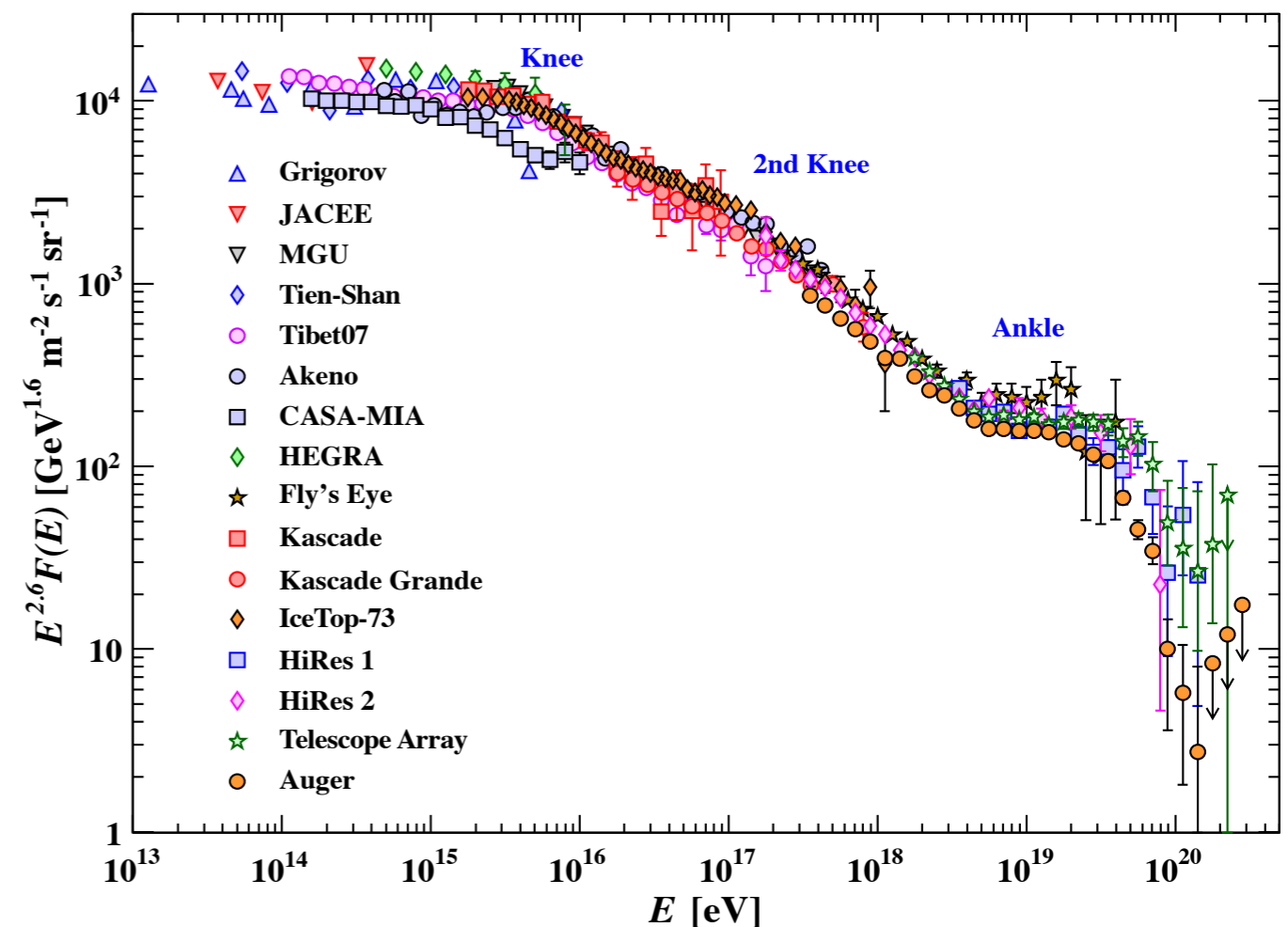
- I raggi cosmici di energia  $E < 10^{17}$  eV sono per la maggior parte di origine galattica
- La maggior parte dei raggi cosmici viene prodotta e accelerata nelle esplosioni di Supernova
- I raggi cosmici attraversano il mezzo interstellare ed interagiscono con il campo magnetico galattico

## SPETTRO DI ENERGIA - COMPOSIZIONE - ANISOTROPIA

*Legge di potenza con un cambiamento dell'indice spettrale a  $\sim 4.5$  PeV*

- ▶ Diminuzione del flusso di elementi leggeri
- ▶ Cut off ad energie proporzionali a  $Z$
- ▶ Lo spettro all-particle è la somma degli spettri delle singole componenti

$$E_Z = Z \cdot E_{Knee}$$



# SPETTRO DI ENERGIA E COMPOSIZIONE

*Legge di potenza con un cambiamento dell'indice spettrale a ~ 4.5 PeV*

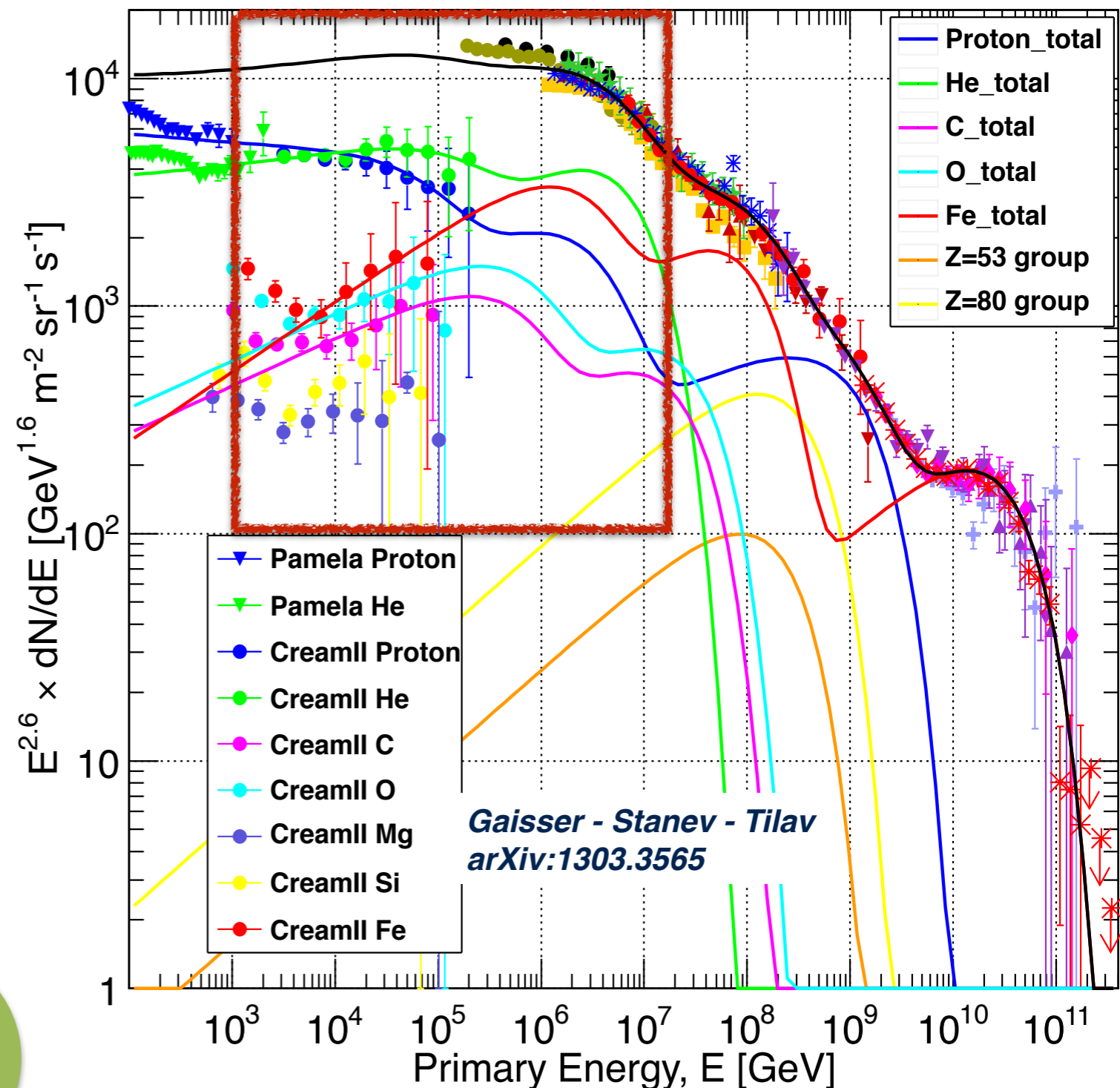
- ▶ Diminuzione del flusso di elementi leggeri
- ▶ Cut off ad energie proporzionali a Z
- ▶ Lo spettro all-particle è la somma degli spettri delle singole componenti

$$E_Z = Z \cdot E_{Knee}$$

*Importanza della misura della composizione al ginocchio*

*ARGO-YBJ può esplorare la regione energetica 1-10000 TeV*

## Regione accessibile ad ARGO-YBJ



# L'ESPERIMENTO ARGO-YBJ

Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN) - Chinese Academy of Science (CAS)  
(Astrophysical Radiation with Ground-based Observatory at YangBaJing)

▶ *FISICA DEI RAGGI COSMICI*

▶ *ASTRONOMIA GAMMA*

- Longitudine 90° 31' 50" East
- Latitudine 30° 06' 38" North
- Altitudine 4300 m s.l.m. (circa 600 g/cm<sup>2</sup>)



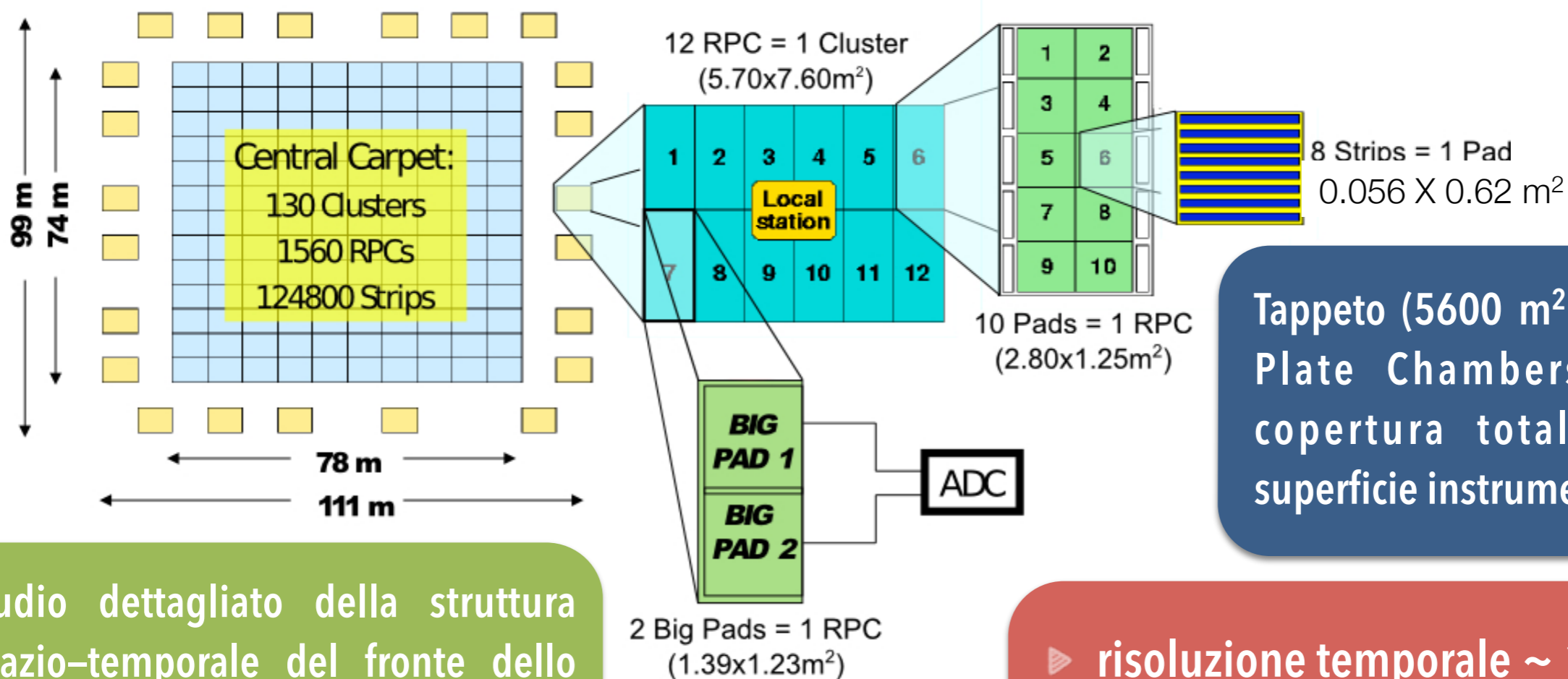
## YANGBAJING COSMIC RAY OBSERVATORY

Tibet AS $\Upsilon$

ARGO



# L'ESPERIMENTO ARGO-YBJ



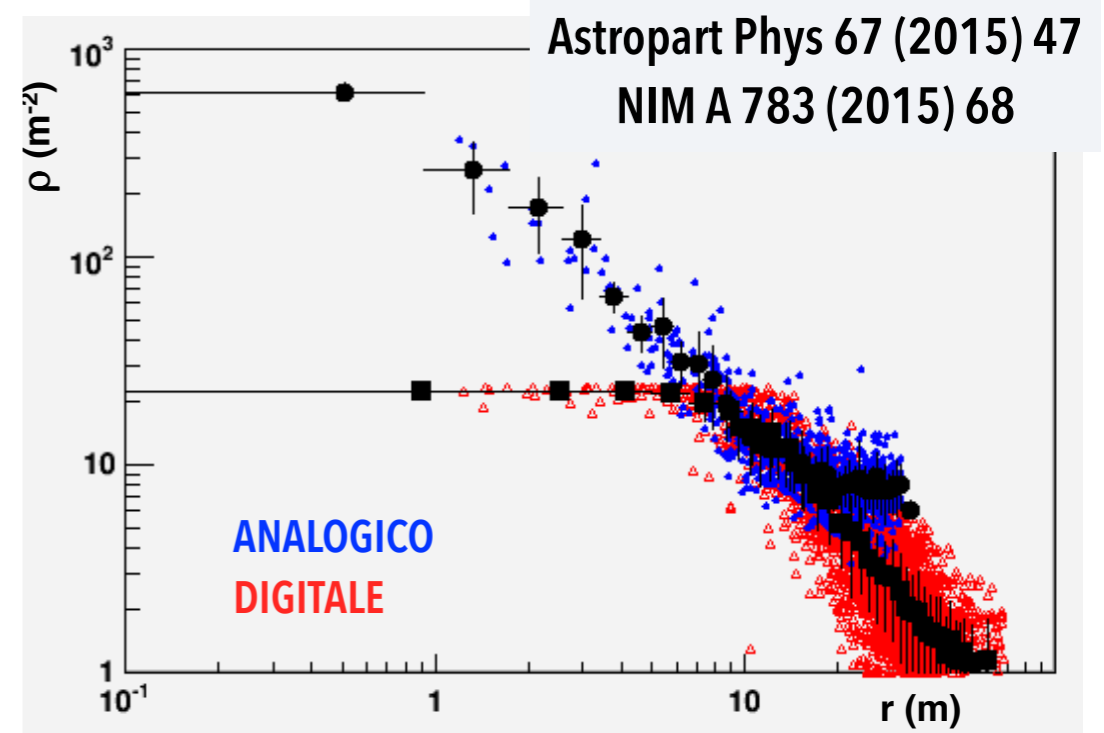
Tappeto (5600 m<sup>2</sup>) di Resistive Plate Chambers (RPCs) a copertura totale (92% di superficie instrumentata)

studio dettagliato della struttura spazio-temporale del fronte dello sciame combinando due differenti sistemi di acquisizione (digitale/analogico)

- ▶ risoluzione temporale ~ 1 ns
- ▶ segmentazione = 5.6 x 62 cm<sup>2</sup>
- ▶ ris. angolare = 0.5° (N<sub>hit</sub> ≥ 500)

# L'ESPERIMENTO ARGO-YBJ

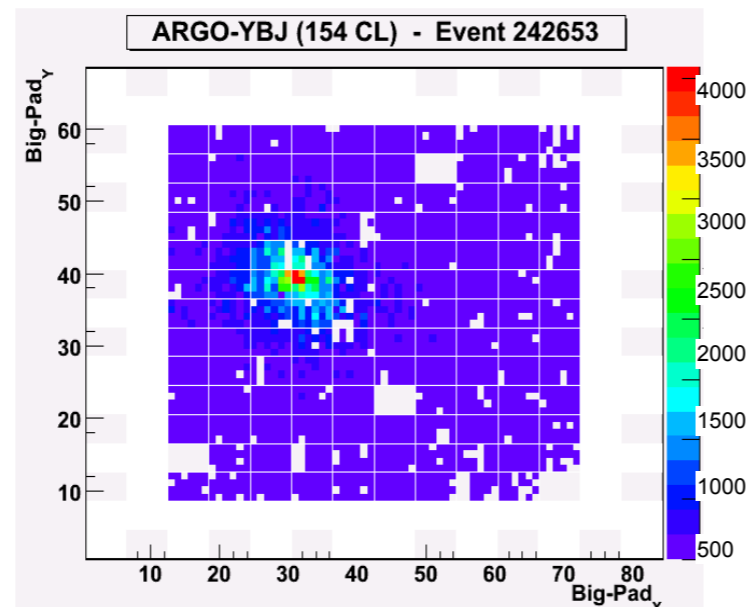
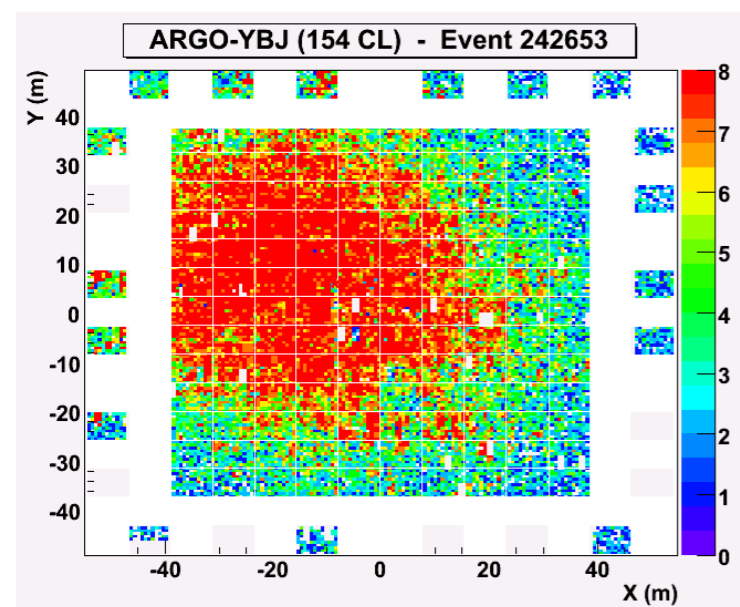
- ✓ Copertura totale ed elevata segmentazione
- ✓ Acquisizione digitale/analogica
- ✓ Area instrumentata:
  - Tappeto centrale  $\sim 5600 \text{ m}^2$
  - Anello di guardia  $\sim 1000 \text{ m}^2$
- ✓ Presa dati stabile da Nov. 2007 a Feb. 2013
- ✓ Duty cycle medio  $\sim 90\%$
- ✓  $\sim 10^{11}$  eventi/anno



Digitale

Stesso evento 😊

Analogico



Sistema di lettura digitale  
Sciame fino a  $\sim 23$  particelle/ $\text{m}^2$   
Sistema di lettura analogico  
Sciame fino a  $\sim 10^4$  particelle/ $\text{m}^2$

Differenti scale di guadagno per esplorare  
un vasto range di densità di particelle

Estensione dell'intervallo massimo di  
energia fino alla regione dei PeV

# STRATEGIA DI ANALISI

- Analisi dei dati del sistema digitale e analogico e misura dello spettro di energia mediante una procedura di unfolding Bayesiano
- Analisi dei dati del sistema analogico e ricostruzione dell'energia evento per evento
- Tecnica ibrida utilizzando i dati provenienti dal sistema analogico e da un telescopio Cherenkov

# SPETTRO p+He – 3-300 TeV

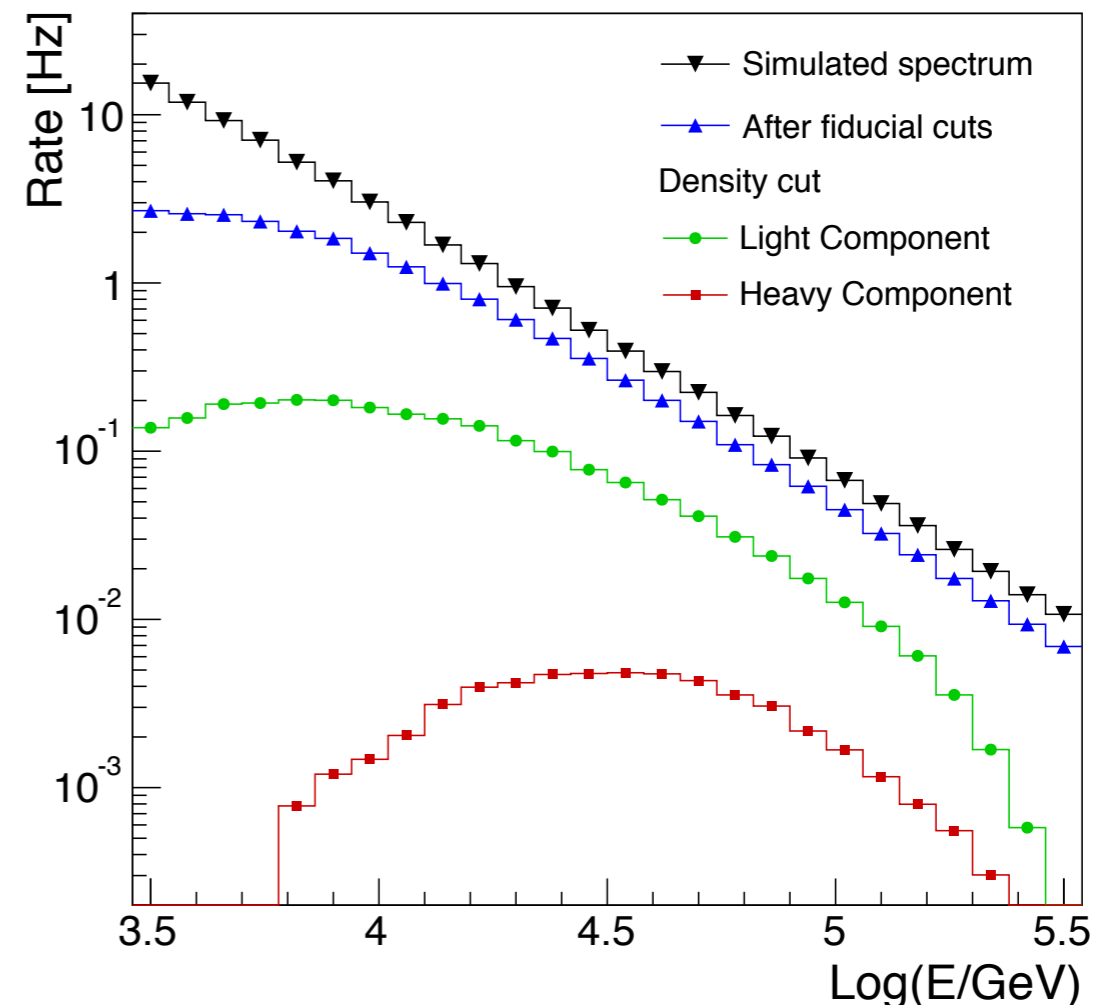
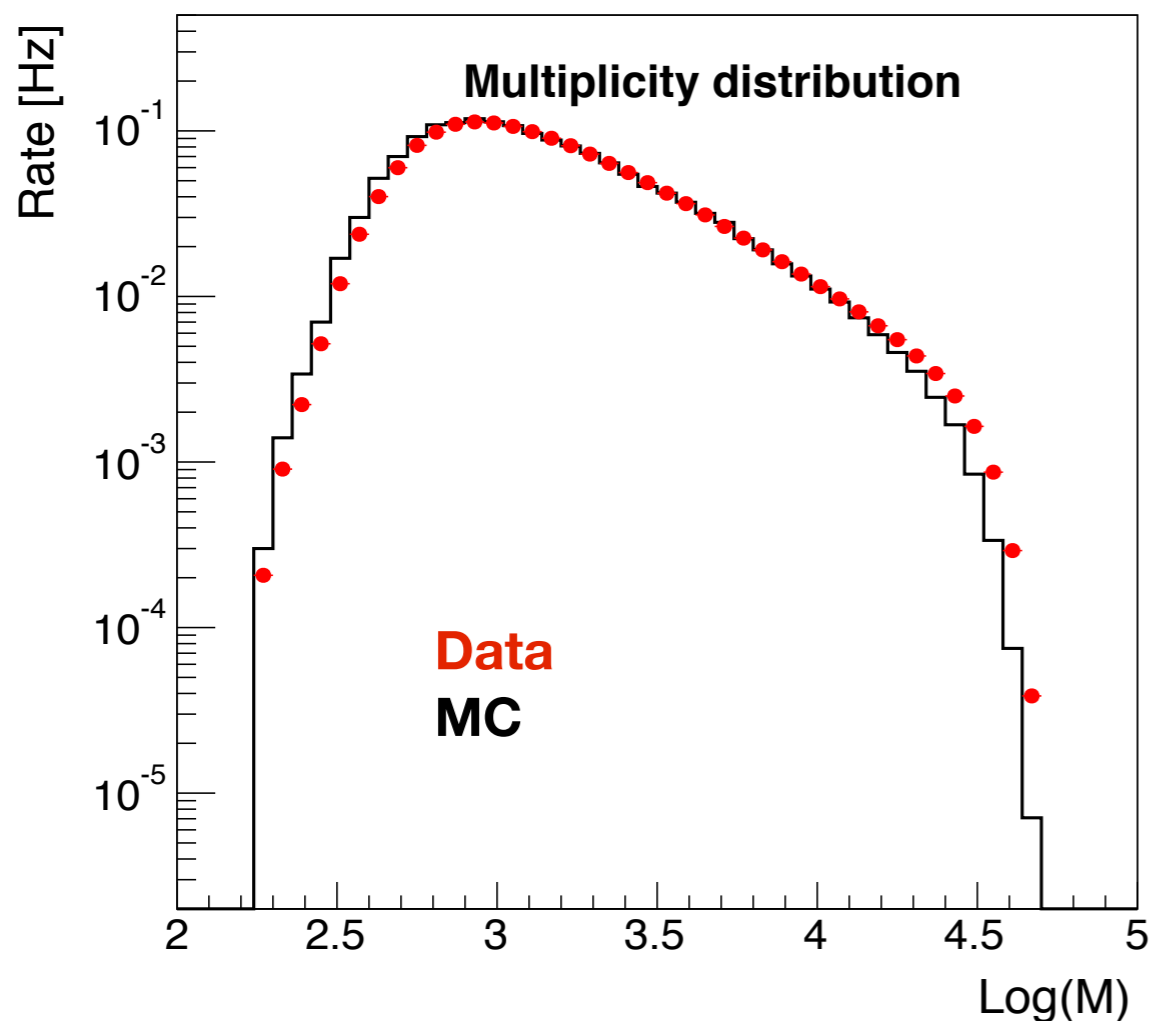
Relazione tra molteplicità di sciame ed energia del primario

$$N(E) \propto N(M) \cdot P(E|M)$$
$$P(E|M) \propto P(M|E) \cdot P(E)$$

Campione di dati 2008 - 2012 (Digitale)

Fiducial cuts

- ▶ Molteplicità di sciame, Angolo allo Zenith ricostruito, posizione del core dello sciame (eventi centrali e quasi verticali)
- ▶ Discriminazione Leggeri-Pesanti: rapporto tra le densità di strip misurate nell'area più interna ed esterna dell'apparato

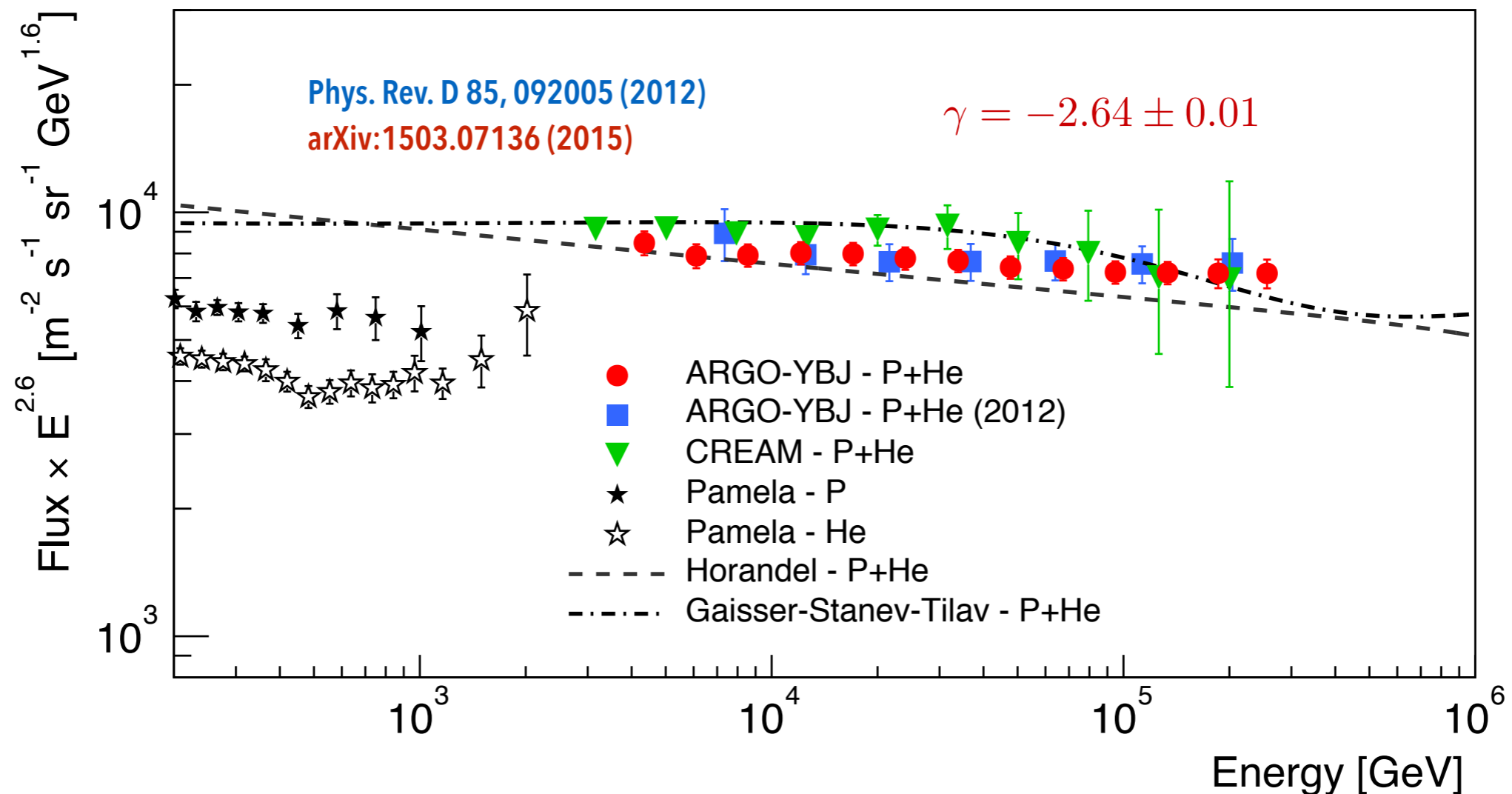




# SPETTRO p+He – 3-300 TeV

Relazione tra molteplicità di sciame ed energia del primario

- ▶ Eccellente stabilità del rivelatore
- ▶ Intervallo energetico che si sovrappone alle misure dirette
- ▶ Incertezza totale < 10%

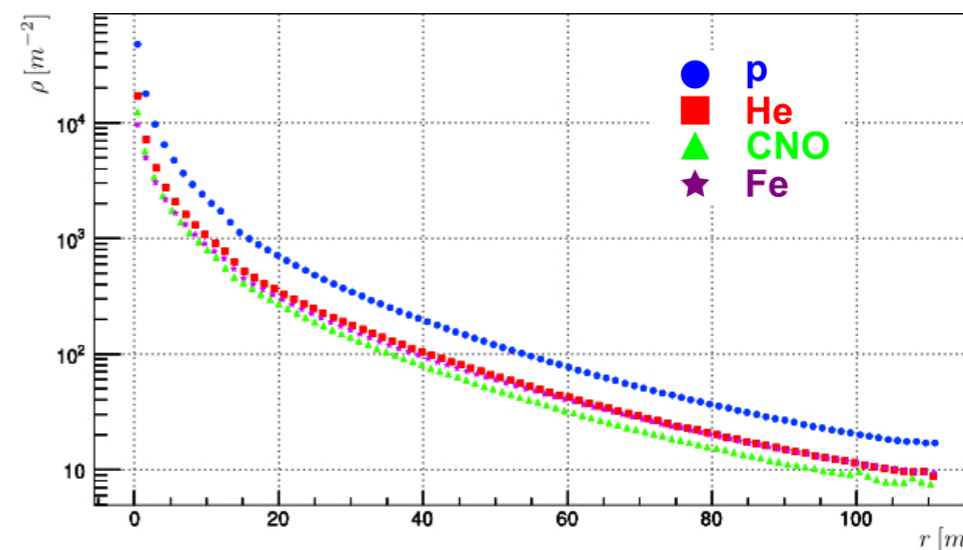


# ANALISI DEI DATI DEL SISTEMA ANALOGICO

Analisi basata sul parametro  $N_p^{8m}$  numero di particelle entro un raggio di 8 m dal core

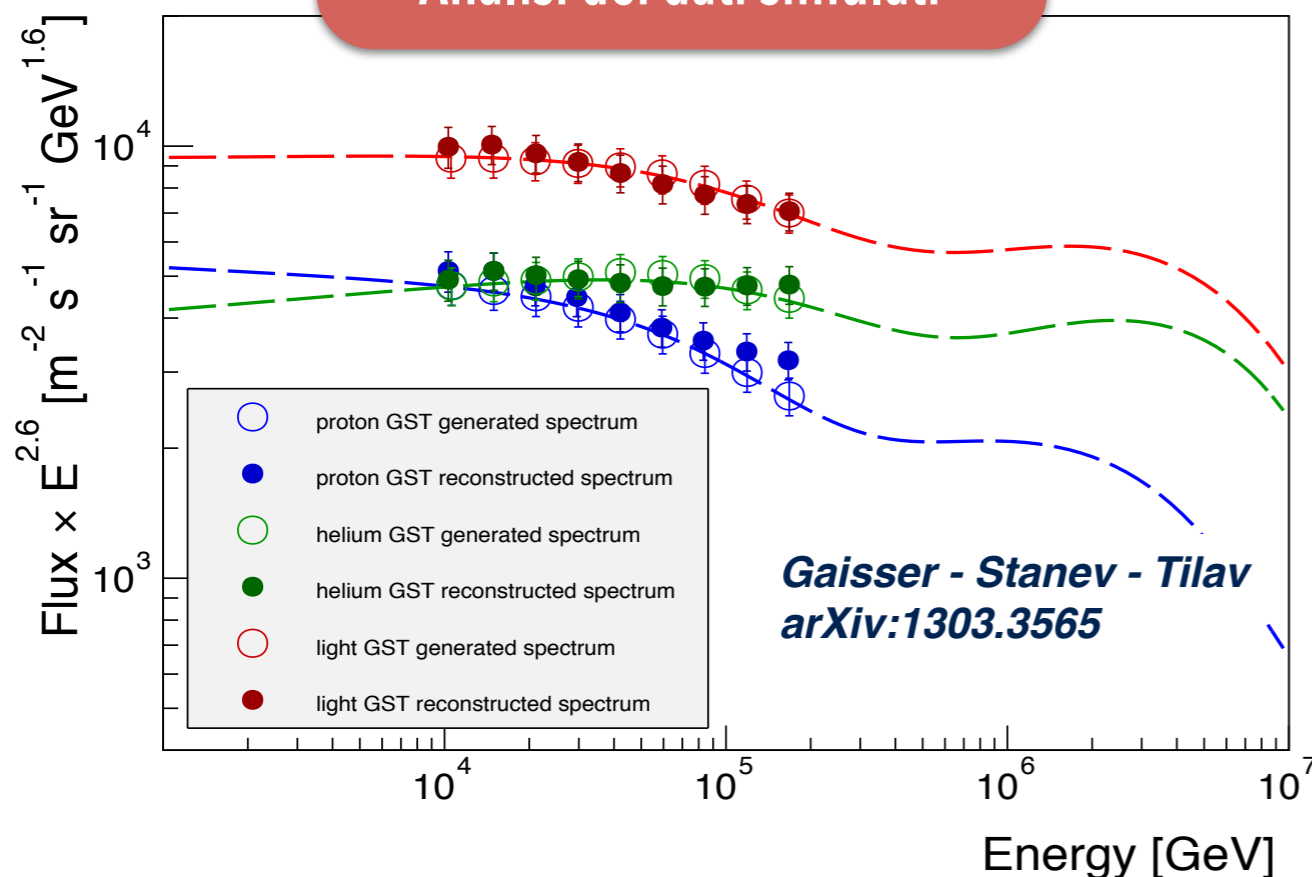
La distribuzione laterale può essere utilizzata per la discriminazione leggeri-pesanti

$\rho_5/\rho_0$   $\rho_{10}/\rho_0$  parametri sensibili alla massa



$$N(E, ID) = P(E, ID | M, D_1, \dots, D_n) \cdot N(M, D_1, \dots, D_n)$$

## Analisi dei dati simulati

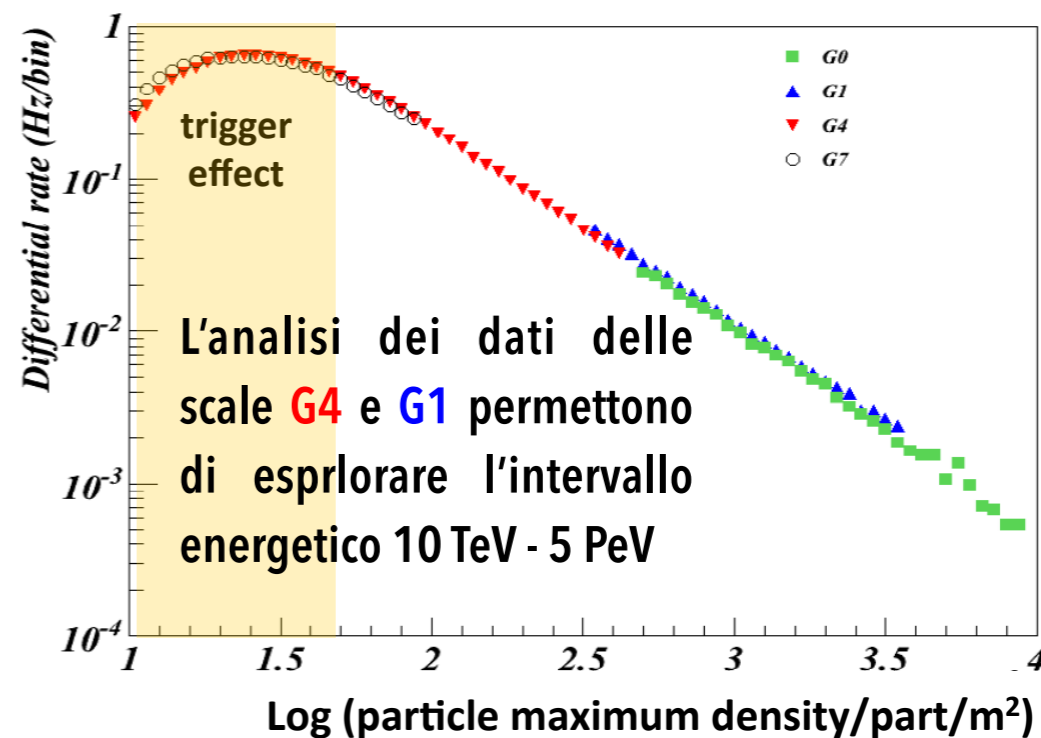


▶ Angolo allo Zenith ricostruito

▶ Posizione del core

▶  $N_p^{8m}$

*EVENTI CENTRALI QUASI VERTICALI*

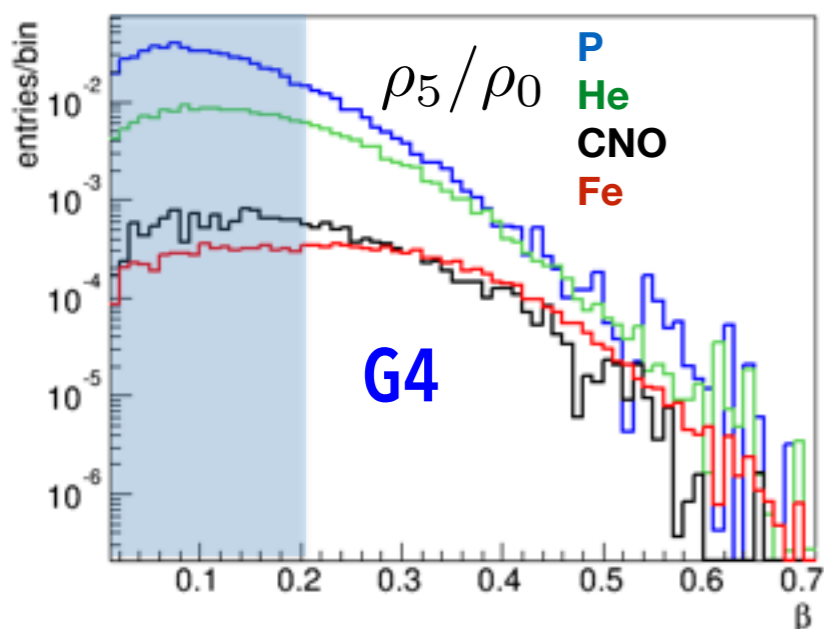
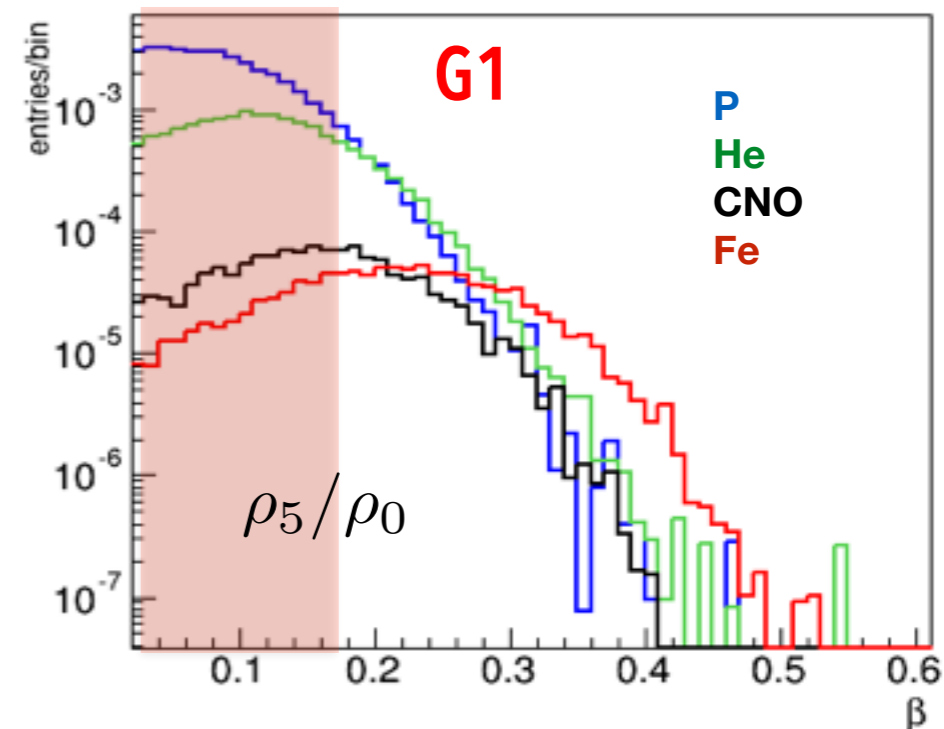


# SPETTRO P + He: 10–3000 TeV

Analisi basata sul parametro  $N_p^{8m}$  numero di particelle entro un raggio di 8 m dal core

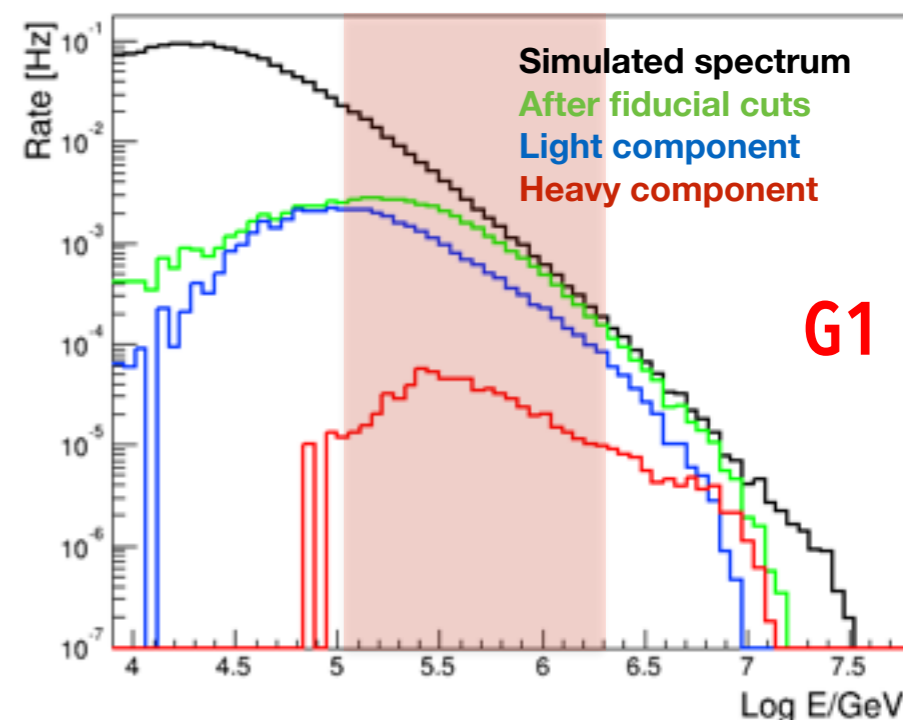
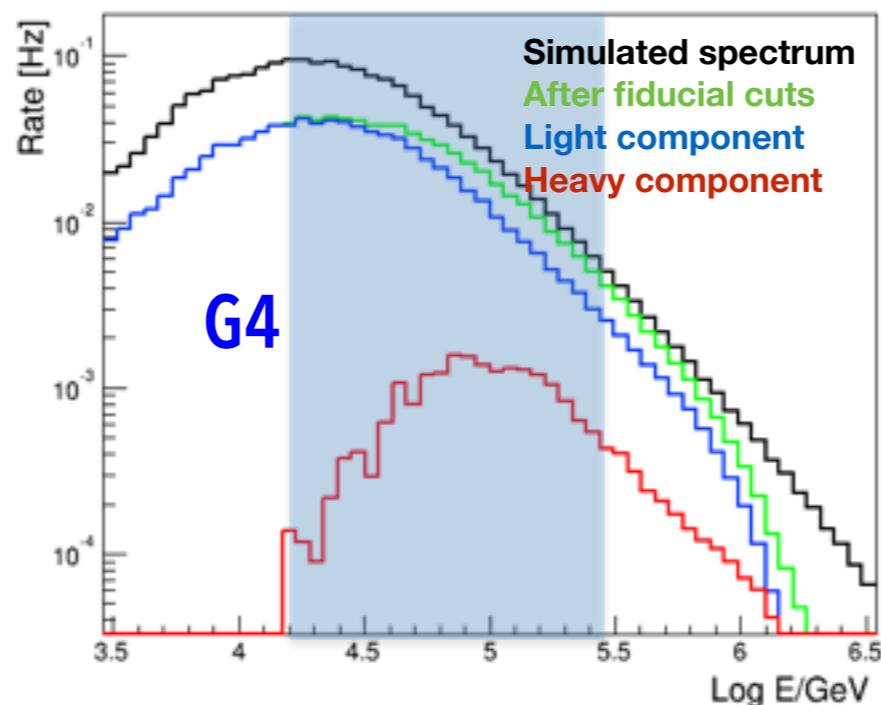
La distribuzione laterale può essere utilizzata per la discriminazione leggeri-pesanti

$\rho_5/\rho_0$   $\rho_{10}/\rho_0$  parametri sensibili alla massa



Raccordo con i risultati ottenuti dalla misura con i dati G4

Raccordo con la regione energetica già esplorata con i dati digitali



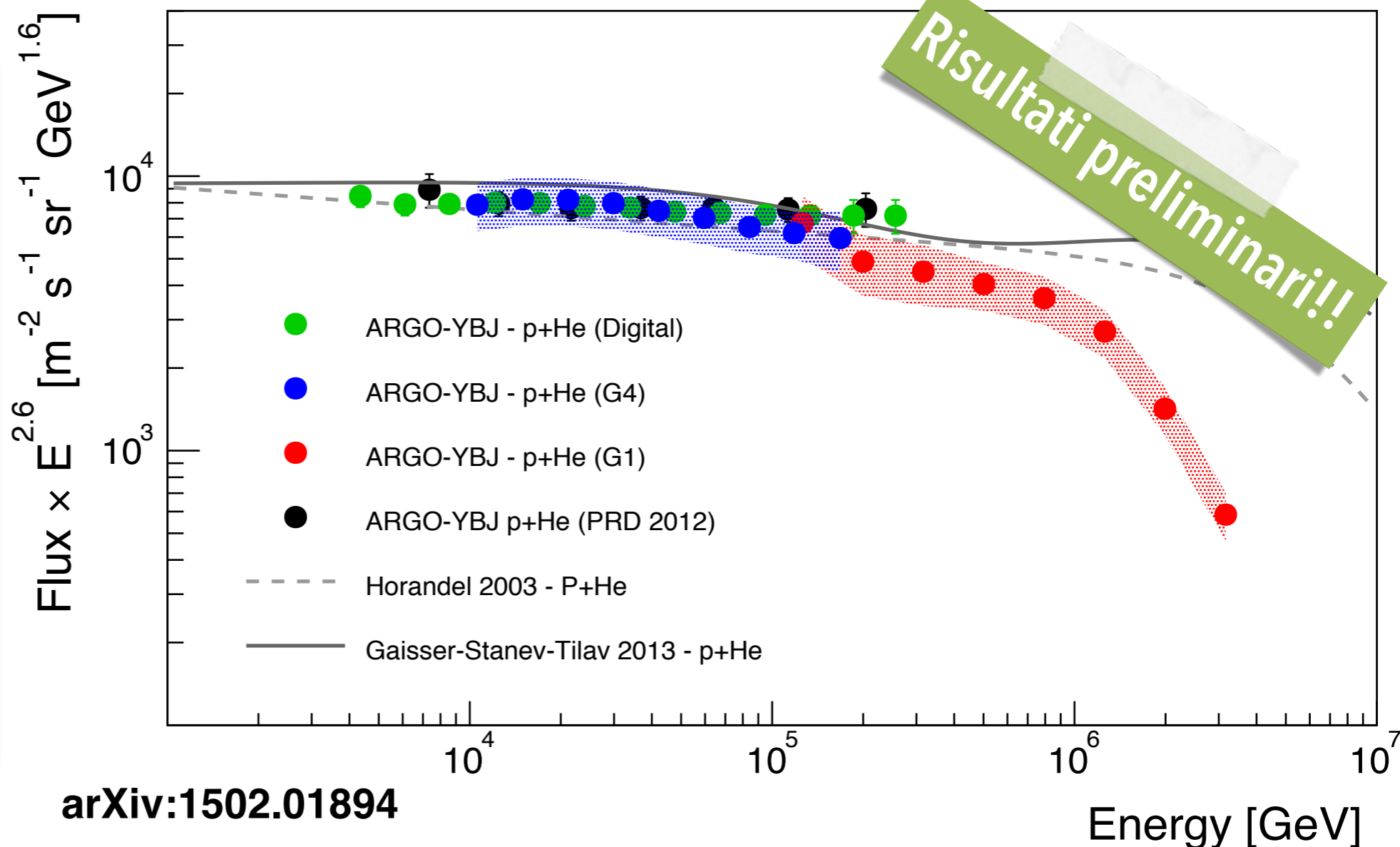
# SPETTRO P + He: 10–3000 TeV

100 – 3000 TeV

- ▶ Cambiamento dell'indice spettrale ad  $E \sim 700$  TeV
- ▶ Stesse incertezze sistematiche di G4 +  $\sim 10$ -12% di contaminazione di elementi pesanti (soprattutto CNO)

10 – 100 TeV

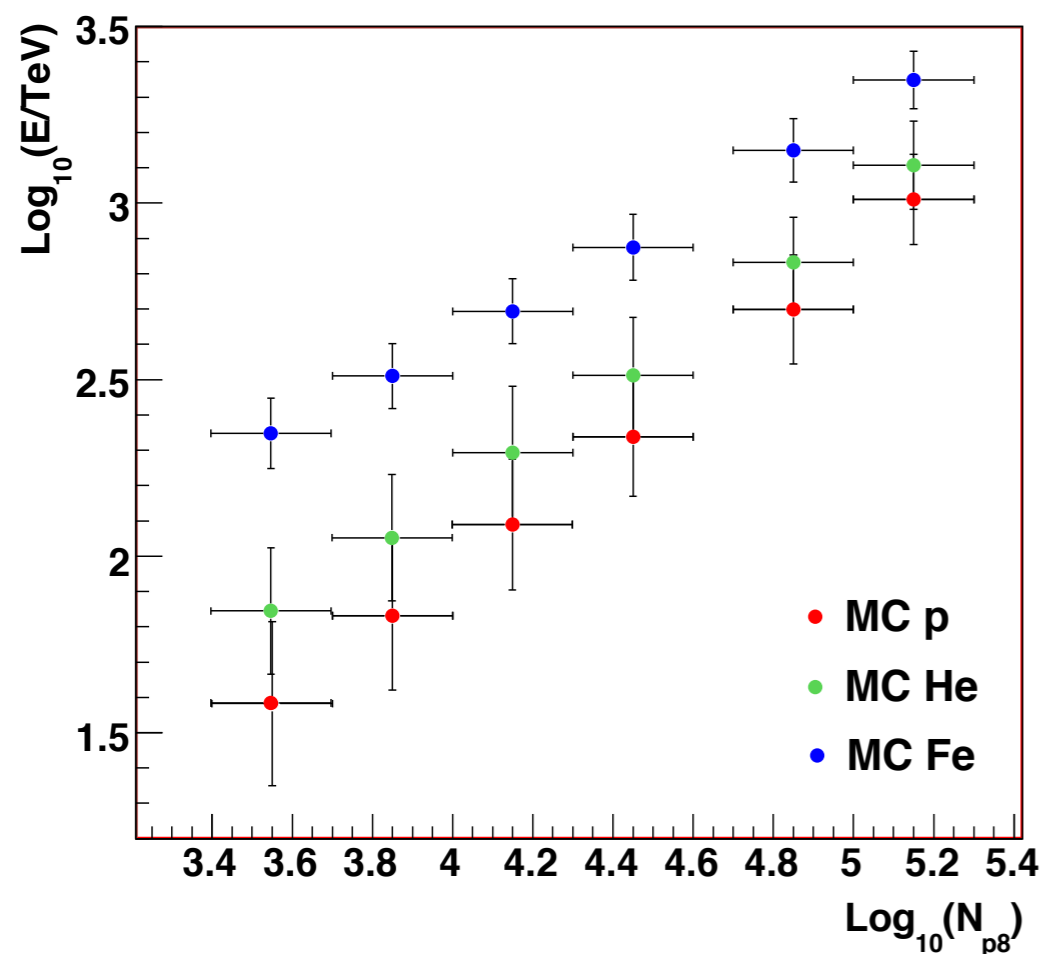
- ▶ Eccellente accordo con i risultati ottenuti dai dati digitali
- ▶ Buona sovrapposizione con le misure dirette in un ampio intervallo energetico
- ▶ Incertezza sistematica  $\sim 10\%$



# RICOSTRUZIONE DELL'ENERGIA DEL PRIMARIO

Analisi basata sul parametro  $N_{p8m}$  numero di particelle entro un raggio di 8 m dal core

- ▶ Correlato con l'energia del primario
- ▶ Non risente della dimensione finita del rivelatore
- ▶ Risente debolmente delle fluttuazioni dello sciame
- ▶ La relazione tra  $N_{p8}$  ed  $E$  dipende dalla massa 😞



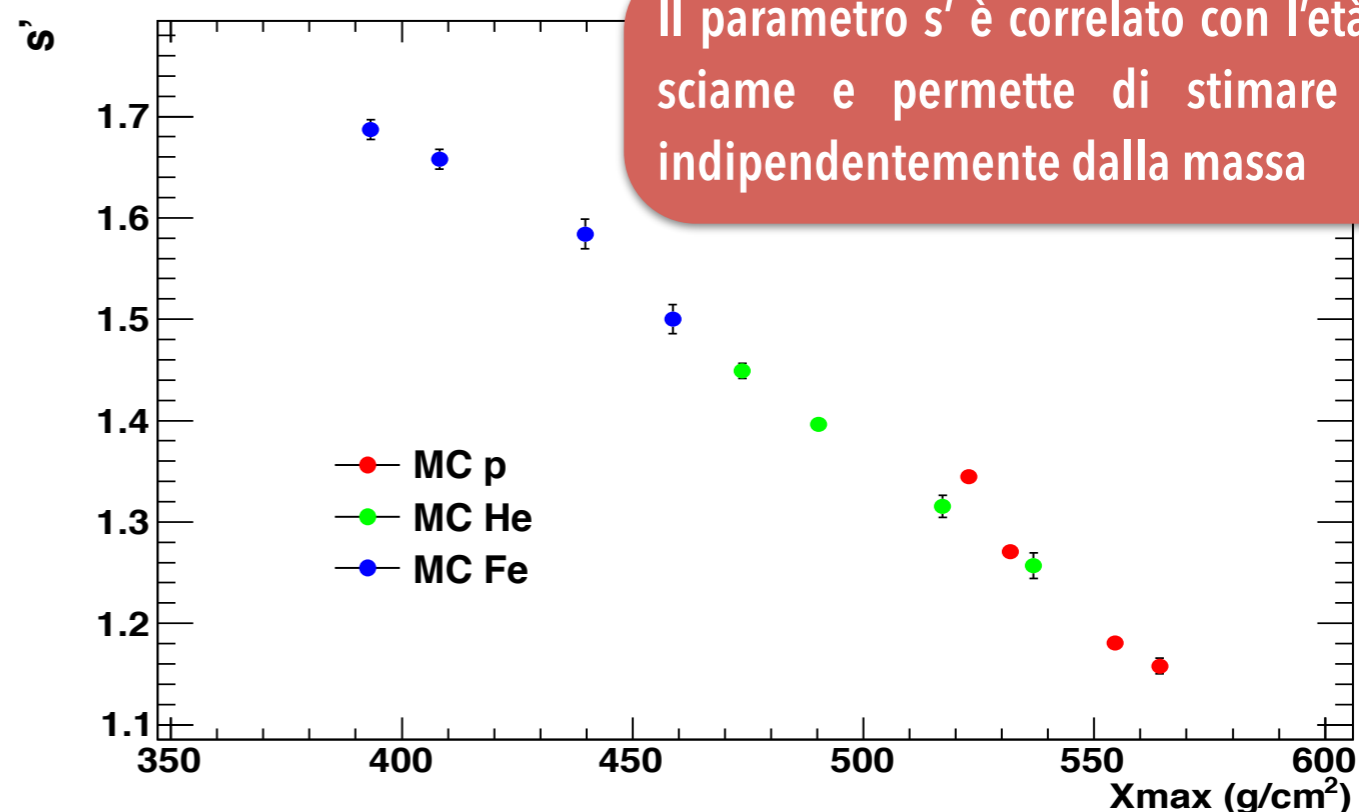
Le informazioni sull'età dello sciame permettono di identificare un estimatore dell'energia indipendente dalla massa.

STUDIO DELLA DISTRIBUZIONE LATERALE (LDF)

$$\rho_{NKG} = A \cdot \left(\frac{r}{r_0}\right)^{s'-2} \cdot \left(1 + \frac{r}{r_0}\right)^{s'-4.5}$$

Assumendo un assorbimento esponenziale dopo il massimo, si può ricavare il valore di  $N_{p8max}$  utilizzando le misure di  $N_{p8}$  e  $s'$  evento per evento.

$$N_{p8}^{Max} \approx N_{p8} \cdot e^{\frac{h_0 \sec \vartheta - X_{max}(s')}{\lambda_{abs}}}$$



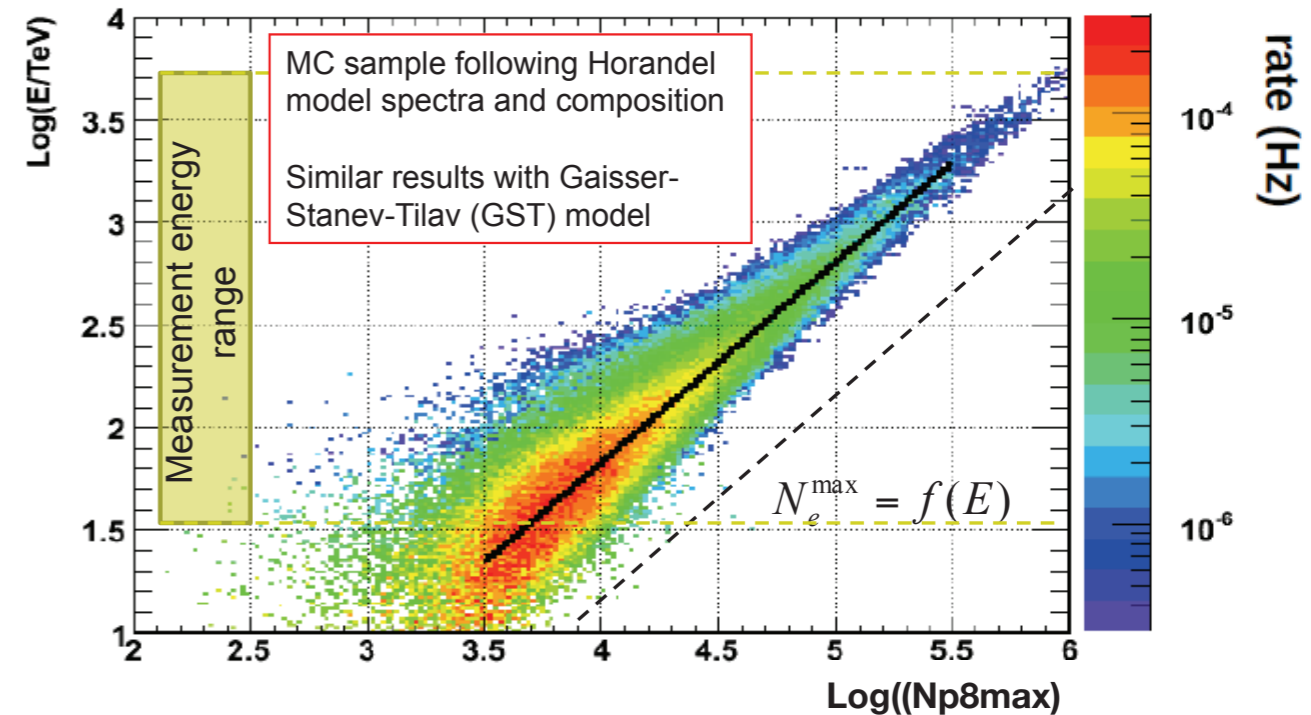
Il parametro  $s'$  è correlato con l'età dello sciame e permette di stimare  $X_{max}$  indipendentemente dalla massa

# RICOSTRUZIONE DELL'ENERGIA DEL PRIMARIO

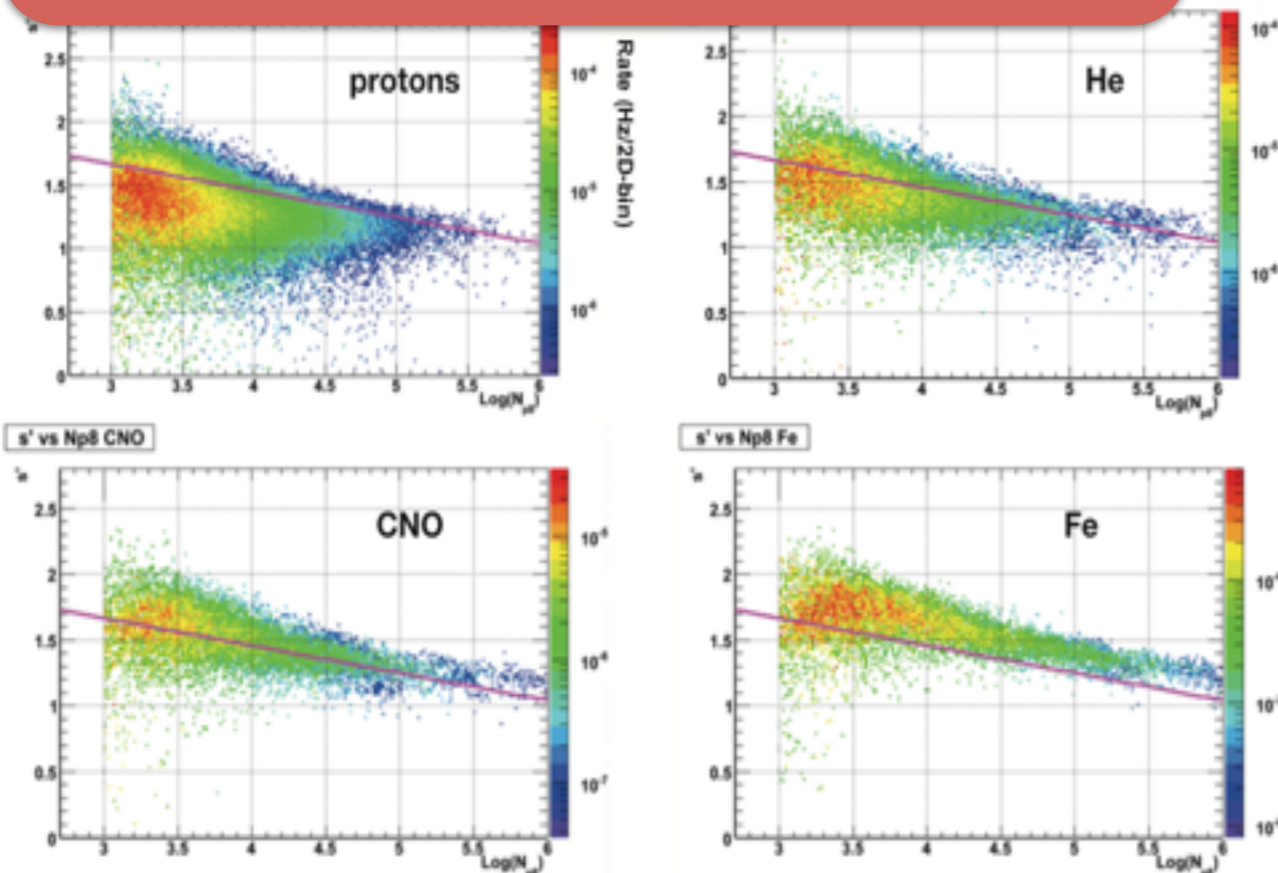
Le misure della molteplicità troncata  $N_{p8}$  e del parametro  $s'$  (correlato con l'età dello sciame) permettono di stimare la molteplicità troncata al massimo dello sciame.

Questo approccio permette di ottenere una stima dell'energia indipendente dalla massa del primario

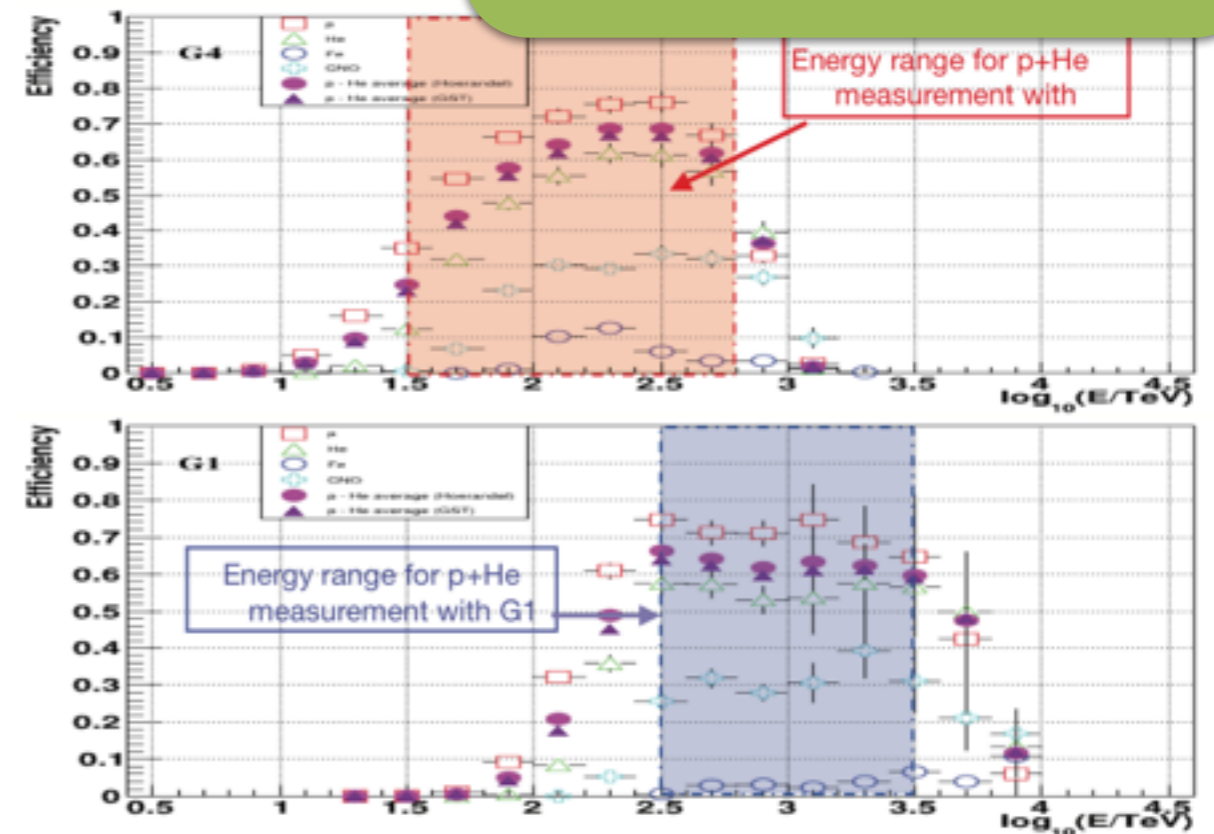
ALL-PARTICLE + Spettro P+He



Taglio nel piano  $s'$  VS  $N_{p8}$  - Discriminazione dei leggeri



Efficienza di discriminazione



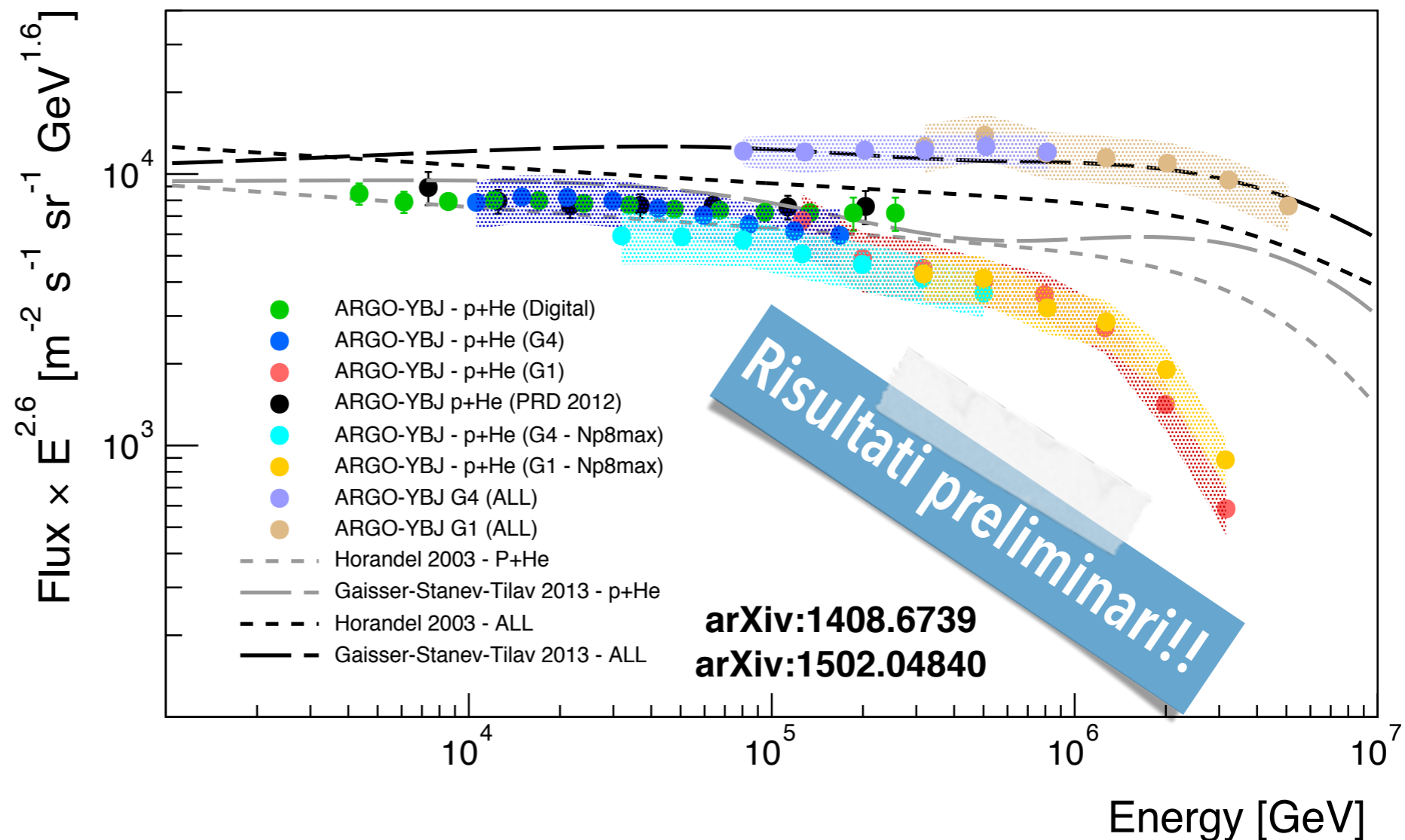
# SPETTRO ALL-PARTICLE & P + He: 30–3000 TeV

ALL PARTICLE

SPETTRO P+He

- ▶ Cambiamento dell'indice spettrale ad  $E \sim 700$  TeV
- ▶ Accordo con l'analisi precedentemente illustrata
- ▶ Sovrapposizione con le misure dirette a bassa energia
- ▶ Stessa sistematica dell'all-particle + contaminazione CNO  $\rightarrow$  totale  $\sim 20\%$

- ▶ Consistente con le precedenti misure e i vari modelli
- ▶ Buona sovrapposizione tra le due scale
- ▶ Evidenza di un indice spettrale  $\sim -2.6$  al di sotto di 1 PeV
- ▶ Incertezza sistematica totale  $\sim 14\%$

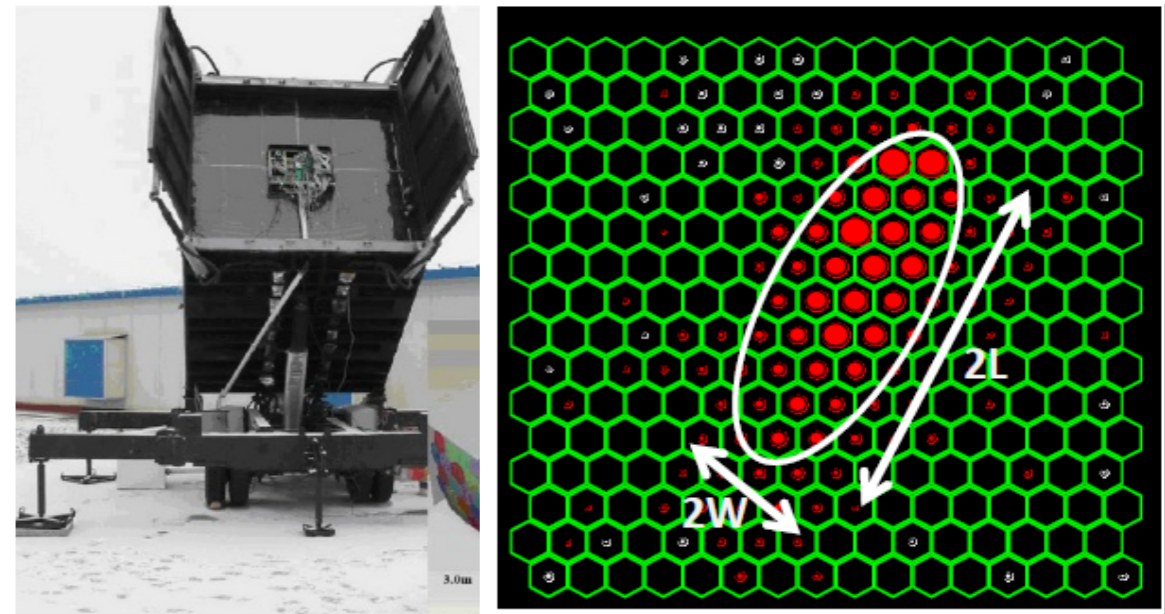


# TECNICA IBRIDA

Stima dell'energia ottenuta sfruttando la misura della geometria dello sciame effettuata con ARGO-YBJ e la misura dell'emissione di luce Cherenkov da parte delle particelle dello sciame

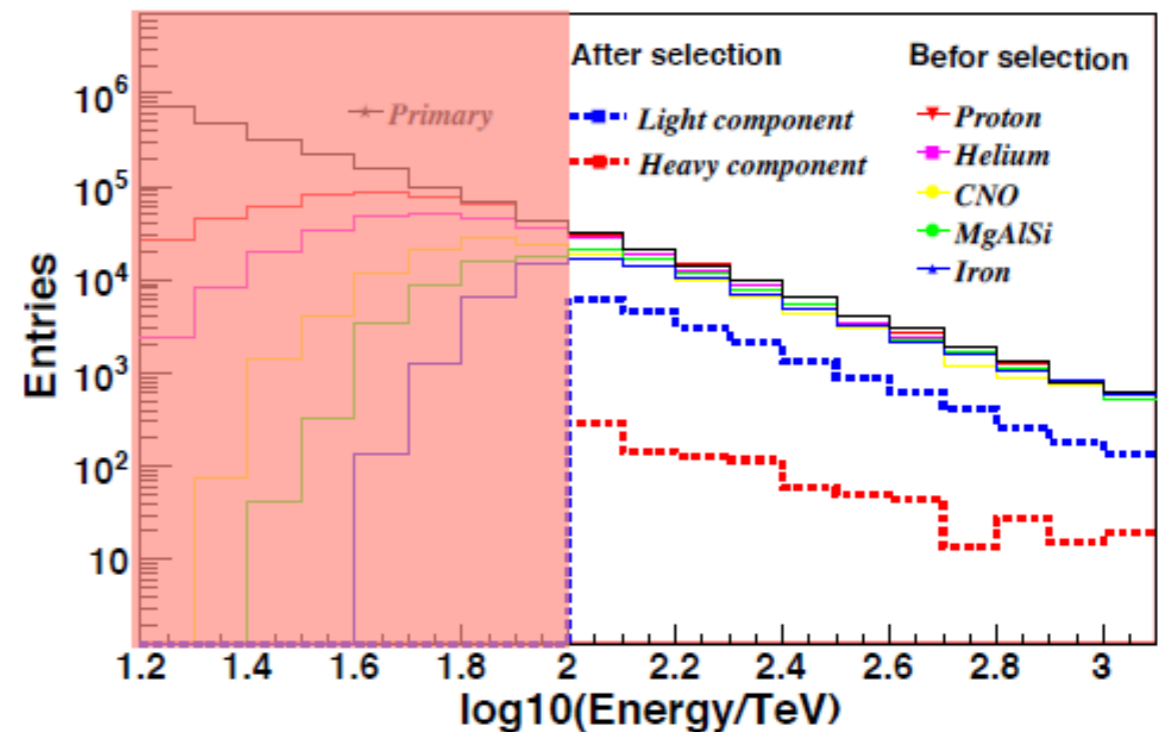
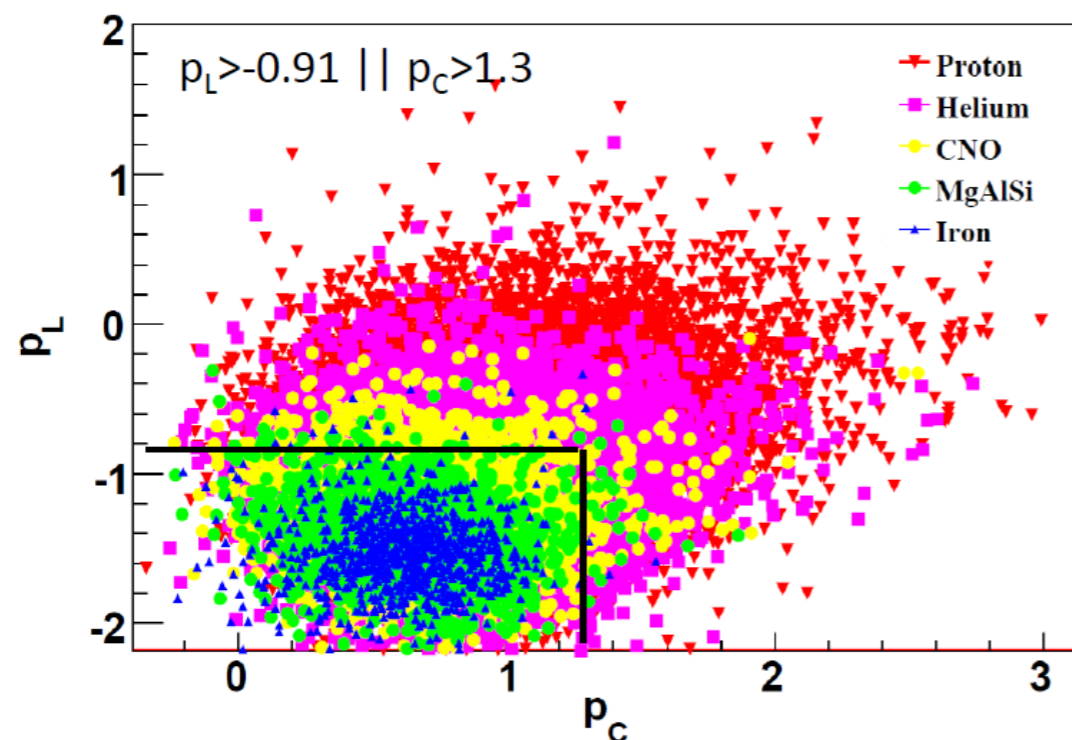
- ▶ ARGO-YBJ:  $N_{Max}$  – Distribuzione laterale (sensibile alla composizione)
- ▶ WFCTA: Distribuzione longitudinale → Parametri di Hillas (sensibili alla composizione);  $N_{Pe}$  → Energia

## WFCTA - Wide FoV Cherenkov Telescope Array



$$p_L = N_{max} - 1.44 \log_{10}(E_{rec}/1\text{TeV})$$

$$p_C = L/W - 0.091 \times (R_p/10\text{m}) - 0.14 \log_{10}(E_{rec}/1\text{TeV})$$



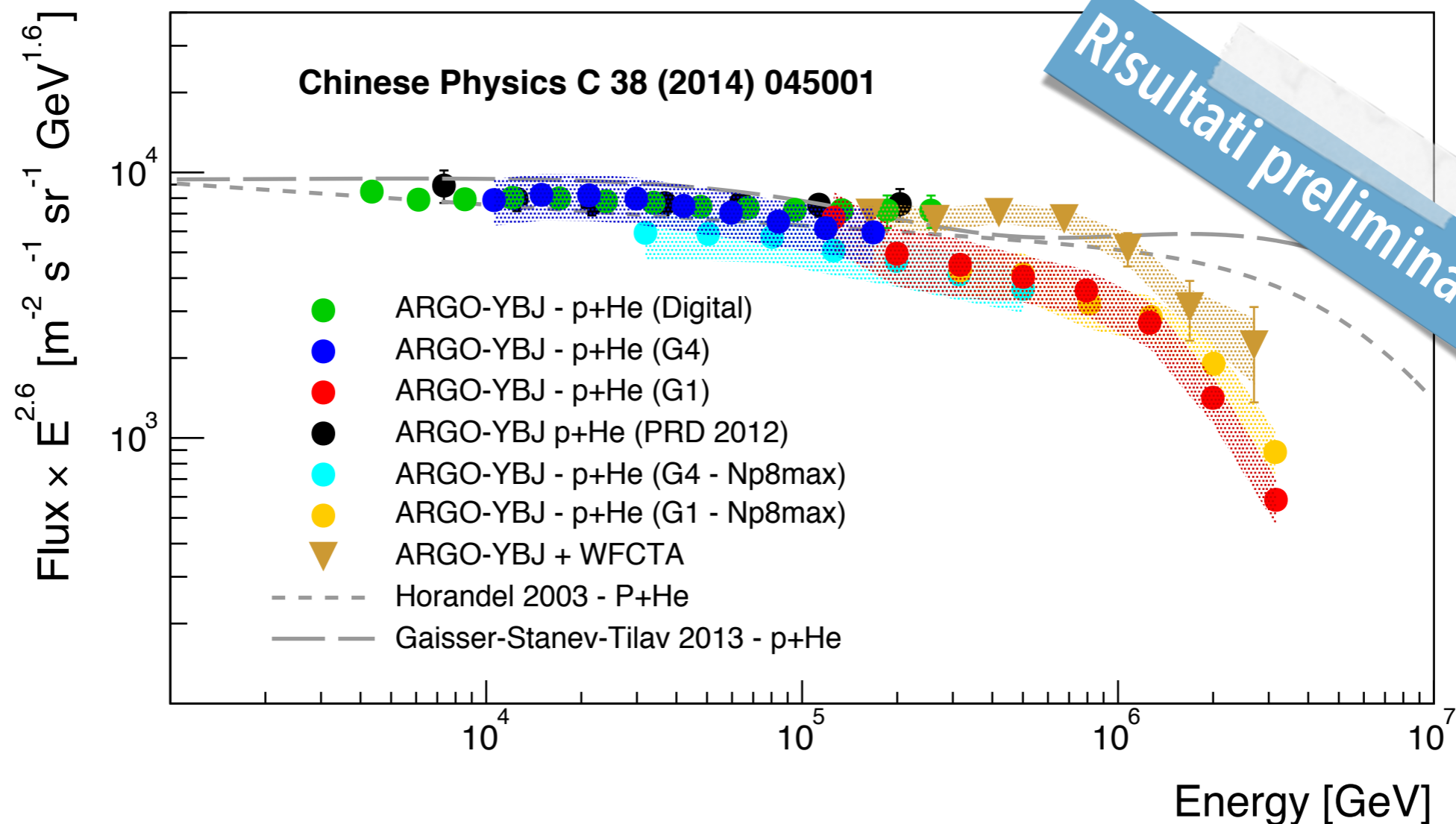


# TECNICA IBRIDA

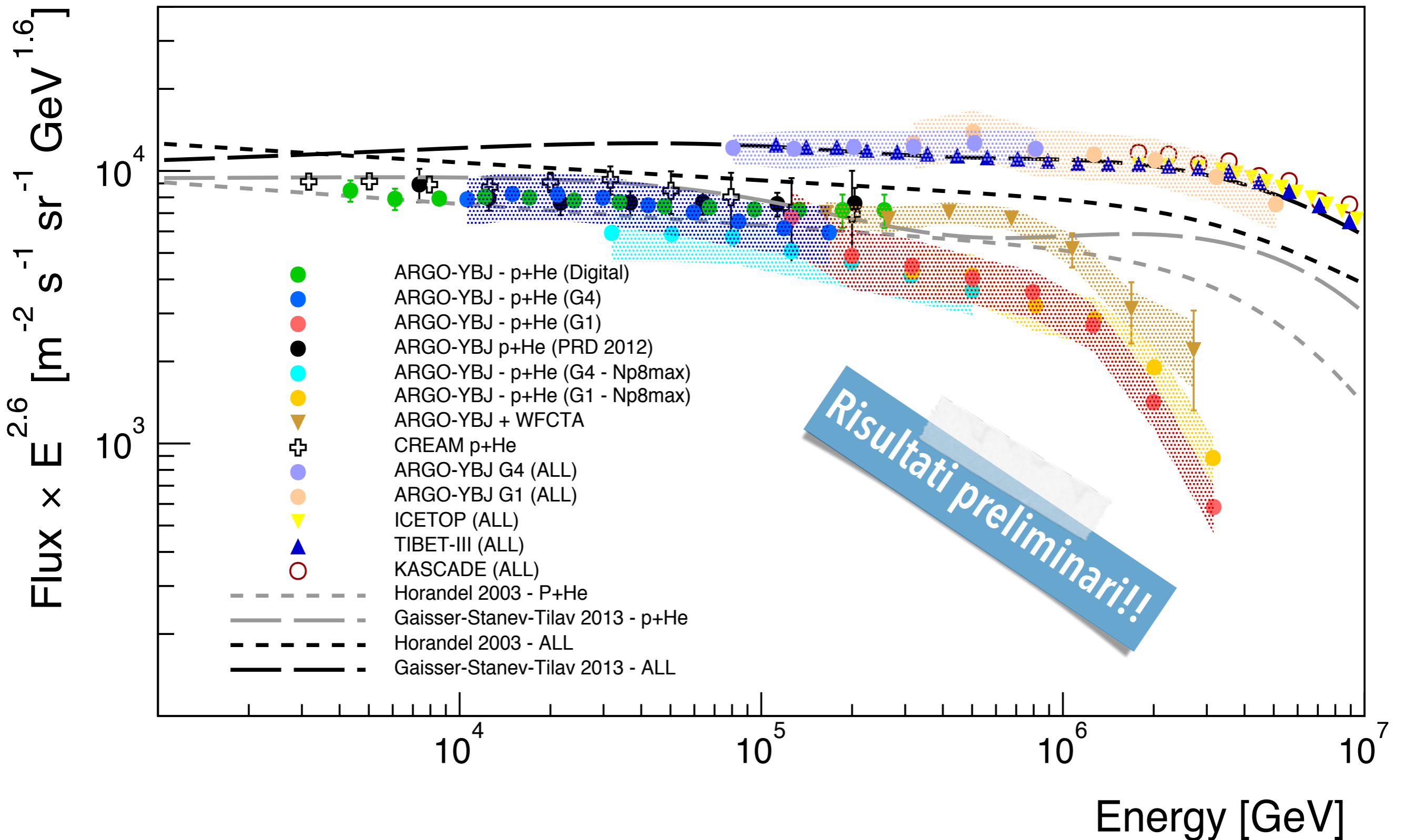
SPETTRO P+He

Intervallo energetico  
20-3000 TeV

- ▶ Cambiamento dell'indice spettrale a ~ 700 TeV
- ▶ Contaminazione degli elementi pesanti < 5 %
- ▶ Risoluzione energetica ~ 25%
- ▶ Incertezza totale ~ 25%



# RIASSUMENDO...



# CONCLUSIONI

Misura dello spettro p+He nell'intervallo energetico 3–300 TeV utilizzando 5 anni di presa dati  
Eccellente stabilità del rivelatore su un lungo periodo

Misura dello spettro p+He nell'intervallo 10-3000 TeV utilizzando i dati del sistema analogico

Evidenza del cambiamento di indice spettrale dello spettro p+He ad energie  $E < 1\text{PeV}$

Due analisi indipendenti forniscono risultati in accordo entro gli errori sistematici. Una terza analisi (approccio ibrido) fornisce risultati consistenti.

## PROSPETTIVE

- ▶ Misura dello spettro all-particle con la tecnica Bayesiana
- ▶ Misura dello spettro della componente pesante ( $m > m_{\text{He}}$ )



**BACKUP**

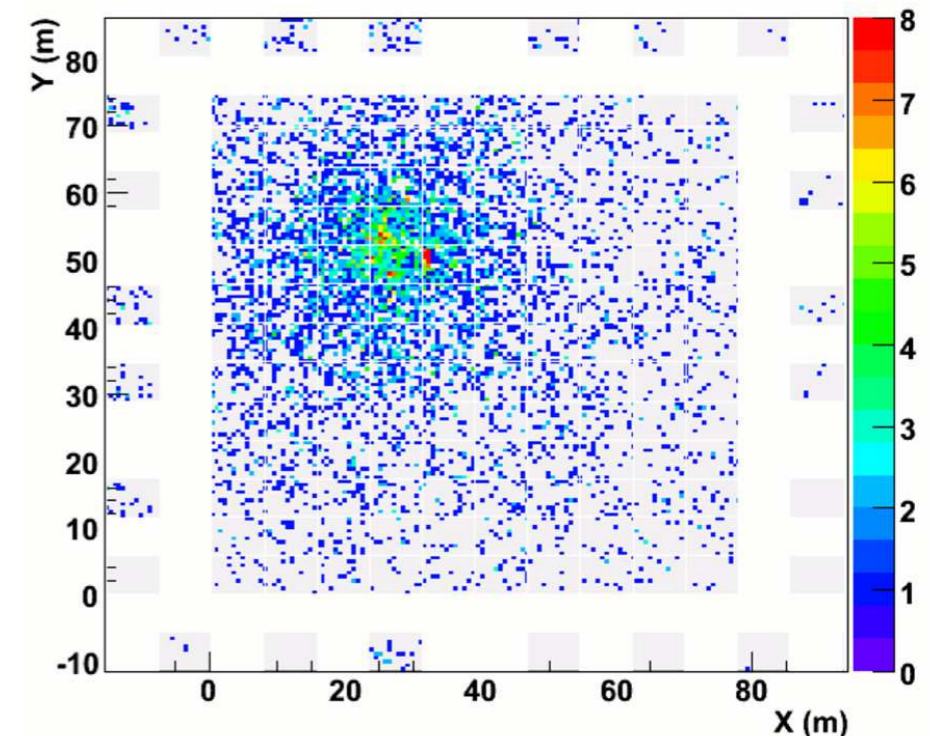
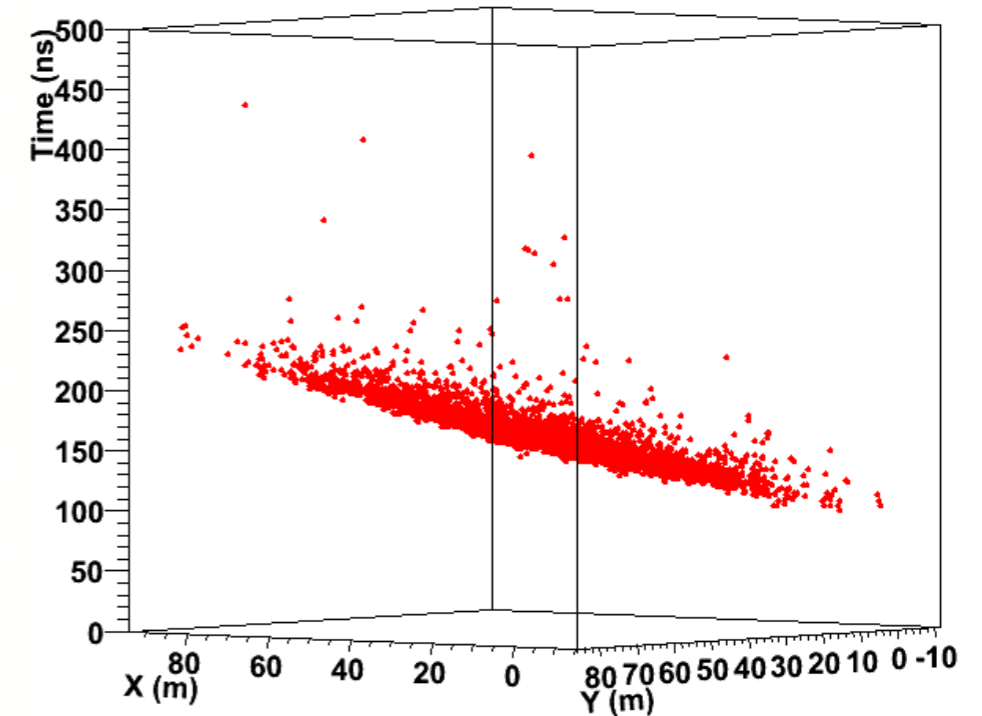
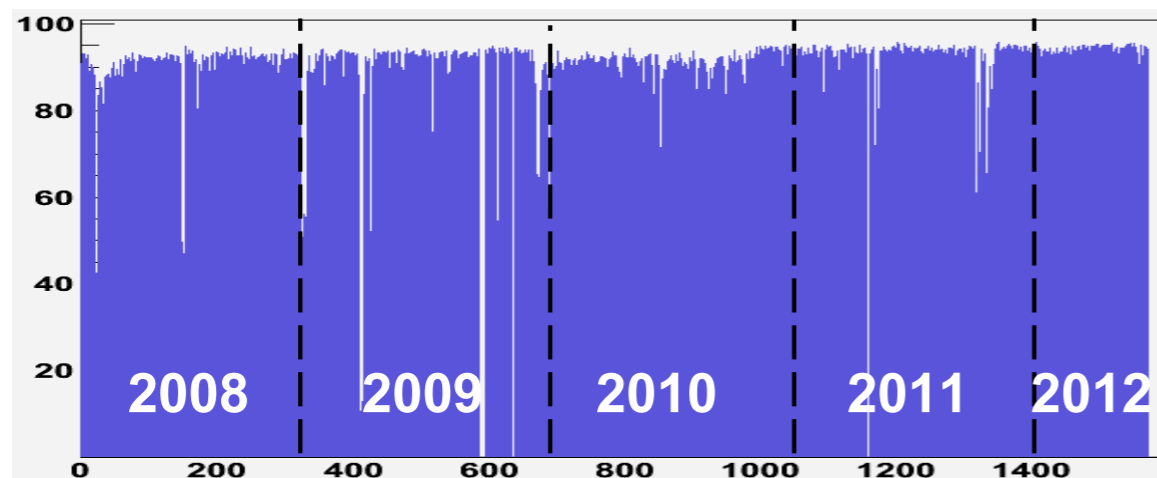
# The ARGO-YBJ experiment

- ✓ Full coverage and high segmentation
- ✓ Digital and analog readout
- ✓ Active area:
  - Central carpet  $\sim 5600 \text{ m}^2$
  - Sampling guard-ring  $\sim 1000 \text{ m}^2$
- ✓ Stable data taking since Nov. 2007 to Feb. 2013 with full detector
- ✓ Average duty cycle  $\sim 90\%$
- ✓  $\sim 10^{11}$  events/year

High space/time granularity  
+ Full coverage  
+ High altitude



detailed study on the  
EAS **space/time structure**  
with unique capabilities

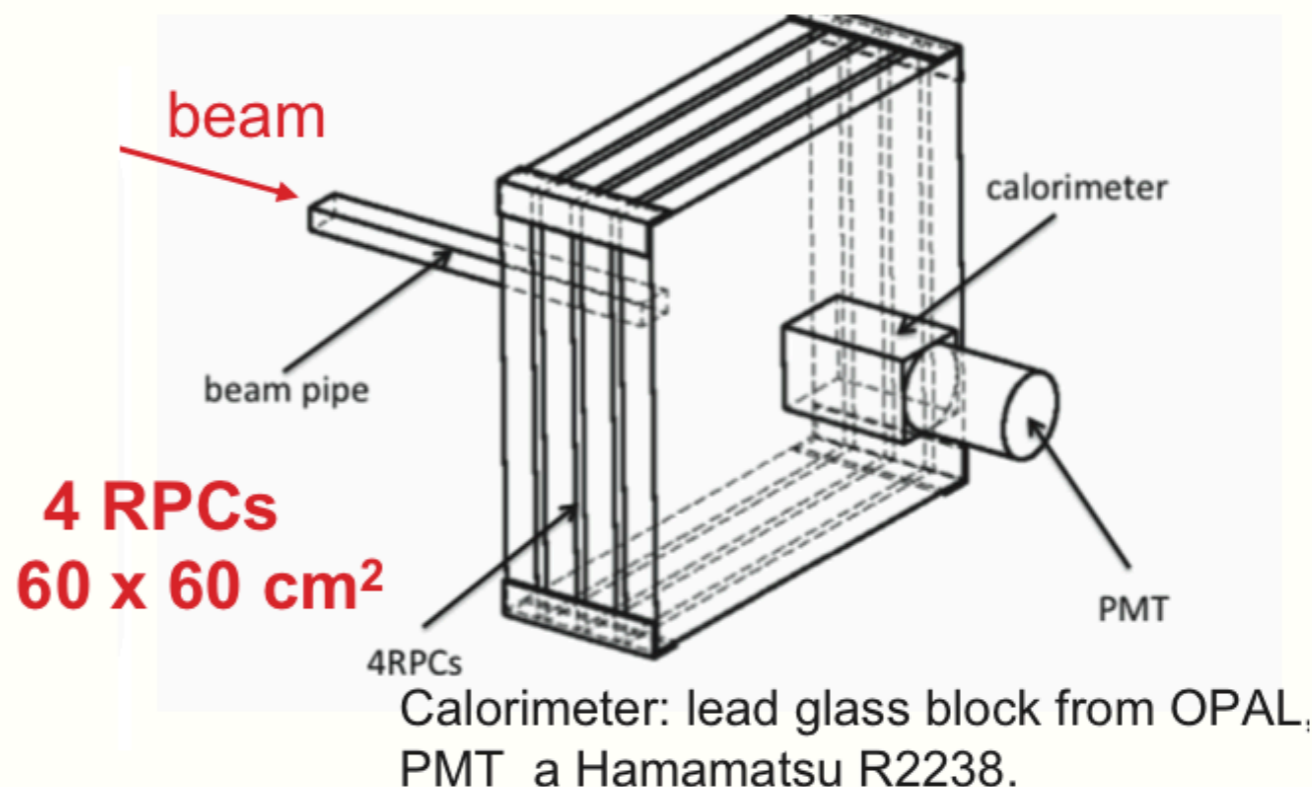


# Intrinsic linearity: test at the BTF facility

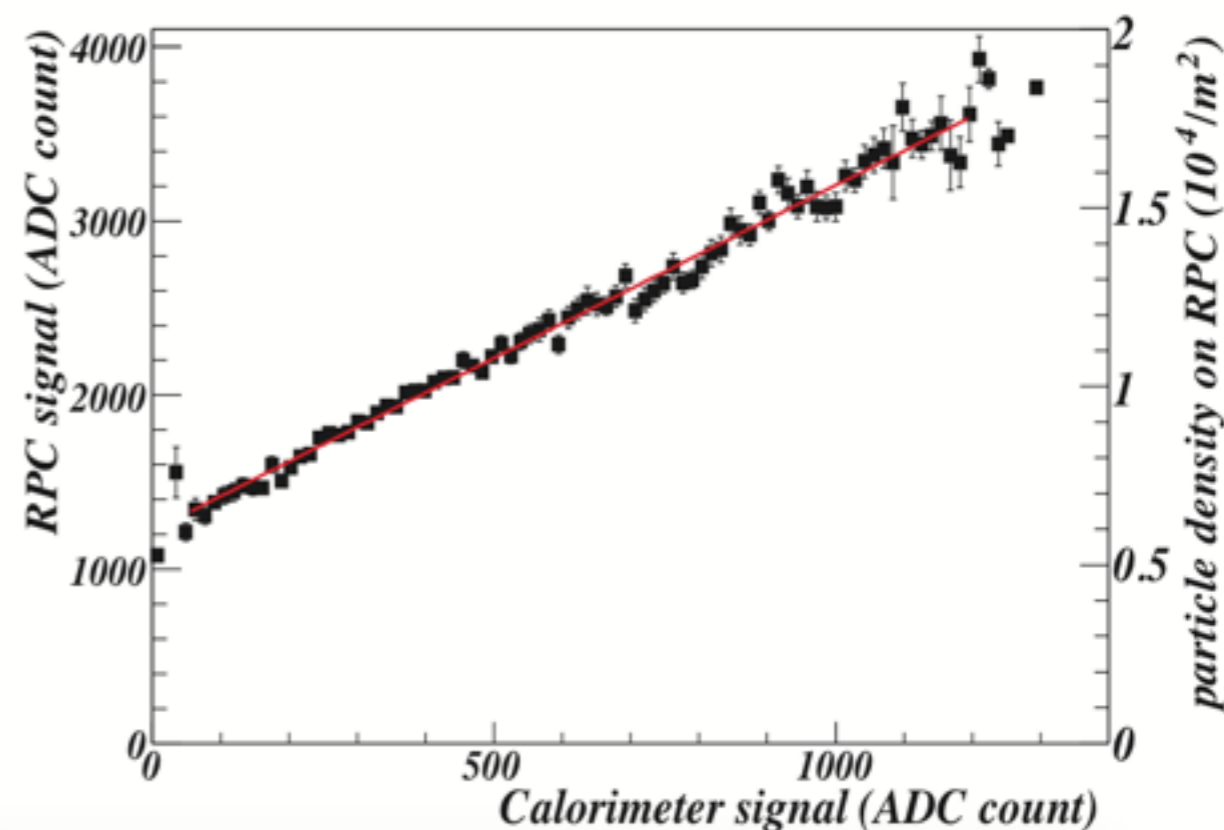
## Linearity of the RPC @ BTF in INFN Frascati Lab:

- *electrons (or positrons)*
- *$E = 25\text{-}750\text{ MeV}$  (0.5% resolution)*
- *$\langle N \rangle = 1 \div 10^8$  particles/pulse*
- *10 ns pulses, 1-49 Hz*
- *beam spot uniform on  $3 \times 5\text{ cm}$*

→ Linearity up to  $\approx 2 \cdot 10^4$  particle/m<sup>2</sup>



The RPC signal vs the calorimeter signal



# Performance evaluation

4 different gain scales used to cover a wide range in particle density:

$$\rho_{\text{max-strip}} \approx 20 \text{ particles/m}^2$$

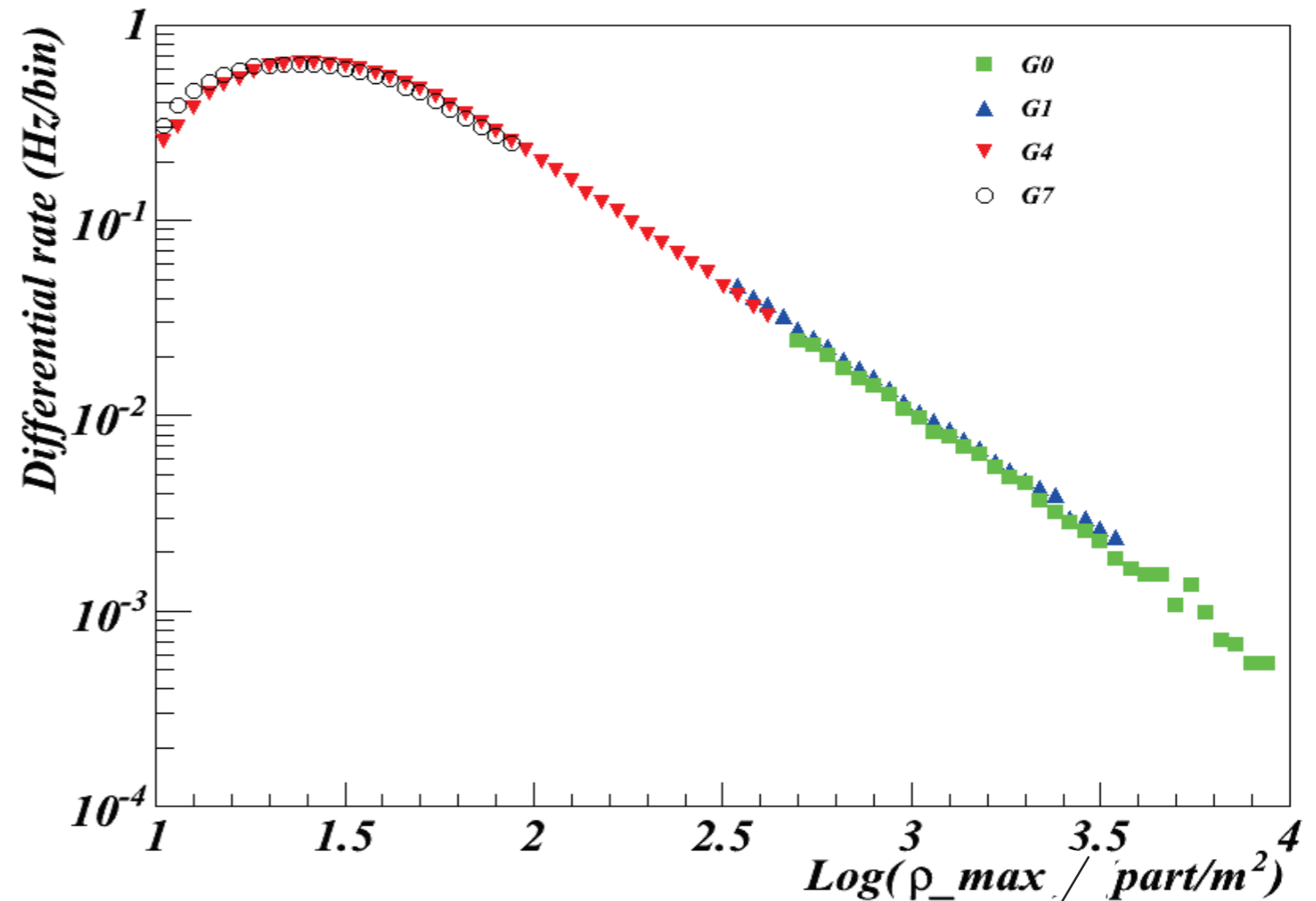
$$\rho_{\text{max-analog}} \approx 10^4 \text{ particles/m}^2$$

4 data sample:

$$\rho: 10 \rightarrow 10^4 \text{ part/m}^2$$

Event selection:

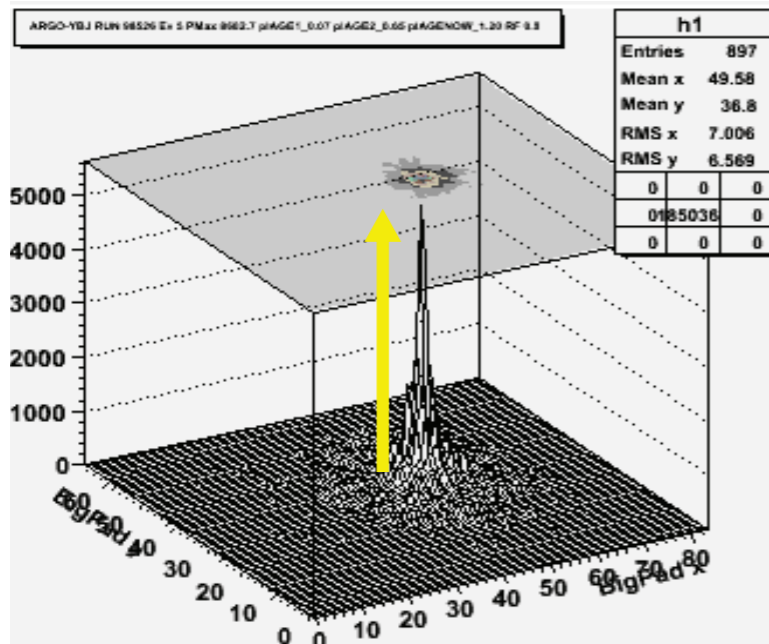
- Core reconstructed in a fiducial area of  $2400 \text{ m}^2$
- Zenith angle  $< 15^\circ$



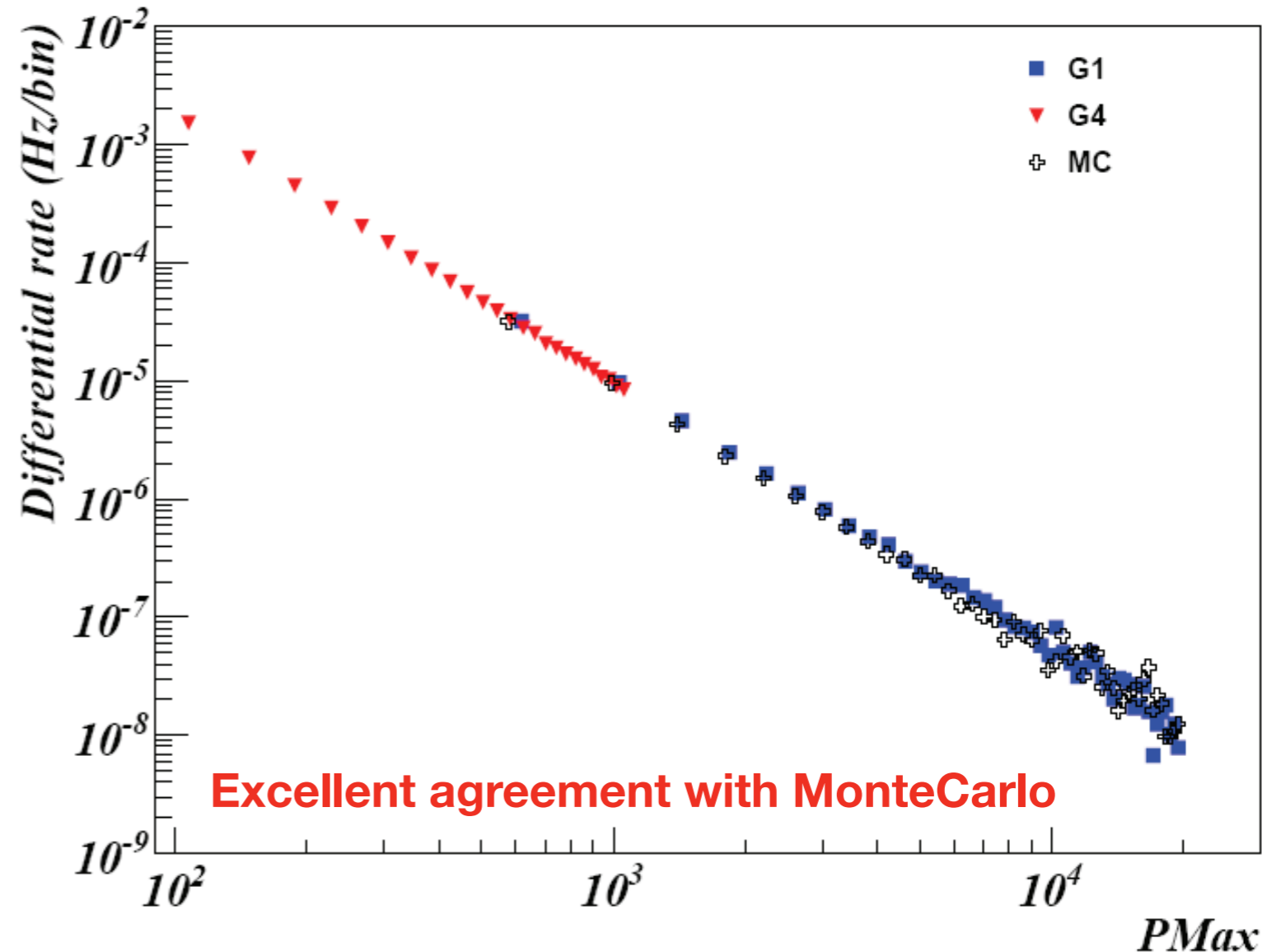
*Good overlap between 4 scales with the maximum density of the showers spanning over three decades*



# Absolute comparison Data - MonteCarlo



Differential rate of Pmax, shower core density, for 2 gain scales



*Pmax spans over two and half decades, while the event frequency runs over five decades.*

J.R. Horandel, *Astrop. Phys.* 19 (2003) 193

Event selection:

- ★ Core reconstructed in a fiducial area of 2400 m<sup>2</sup>
- ★ Zenith angle < 15°

# The Bayesian Unfolding Method

- Learn information about the energy spectrum from the experimental data by using probability theory

Experimental data

Probability theory

Energy Spectrum Composition

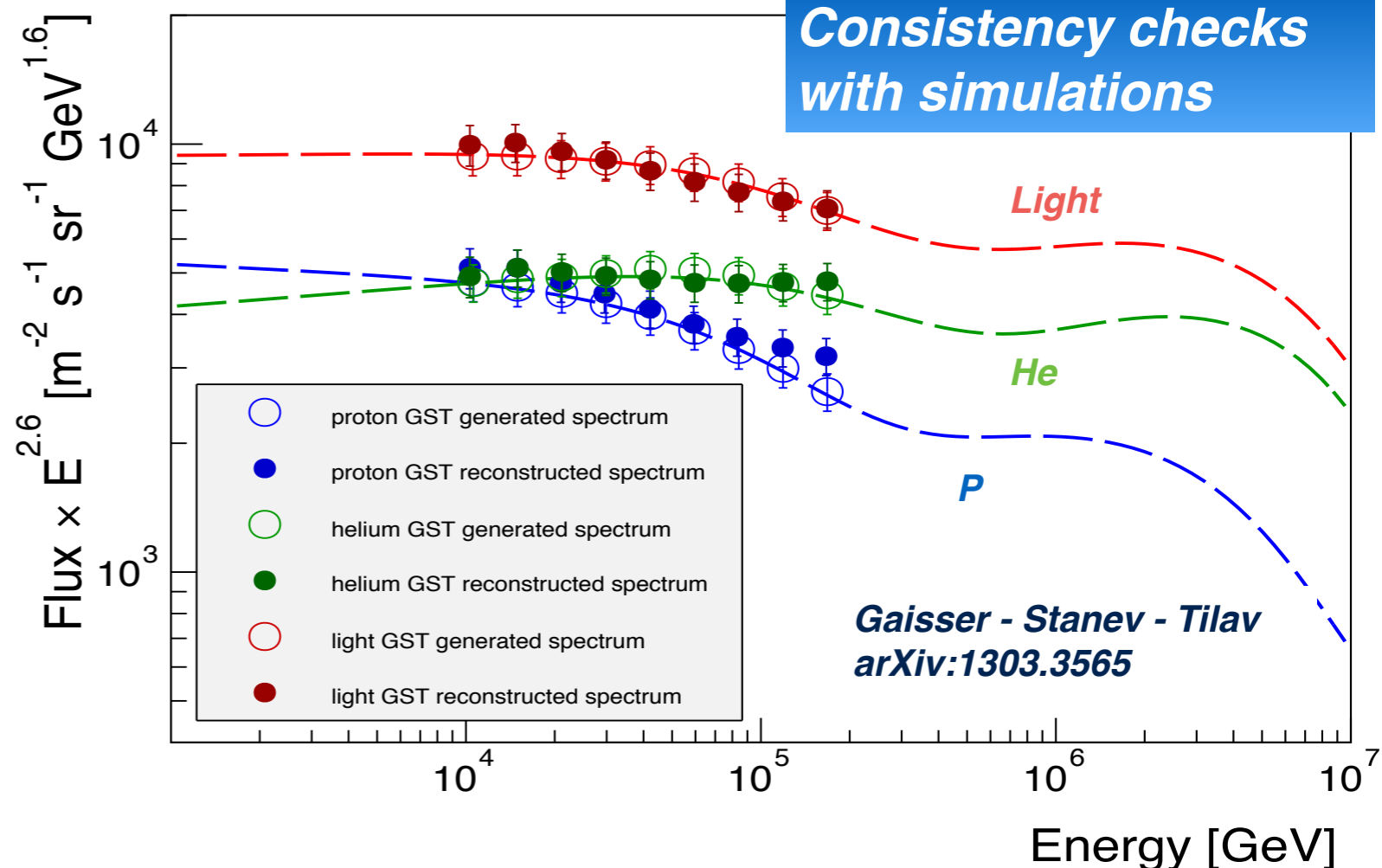
$$N(E, ID) = P(E, ID | M, D_1, \dots, D_n) \cdot N(M, D_1, \dots, D_n)$$

- Causes:  $\{E_i, \dots, E_n; ID_i, \dots, ID_n\}$
- Effects:  $\{M_i, \dots, M_n; D_i, \dots, D_n\}$

Monte Carlo Simulations

+

Iterative procedure



# Data analysis

## Monte Carlo data sample

- ▶ *EAS development: CORSIKA (QGSJETII.03 + FLUKA + EGS4)*
- ▶ *Energy range: 0.316 - 31600 TeV*
- ▶ *Full detector simulation (GEANT3)*
- ▶ *Protons + Helium nuclei + CNO nuclei + Iron nuclei*

## Data sample

*Three data sets in order to explore the energy range 1 - 1000 TeV*

### Digital Readout (1 - 100 TeV)

- *About  $9 \times 10^{10}$  events  
(~ 8000 hours)  
recorded in the period  
Jan. 2008 - Dec 2012*

### G4 Gain Scale (10 - 100 TeV)

- 17 days (195-211) 2010
- 461 Files

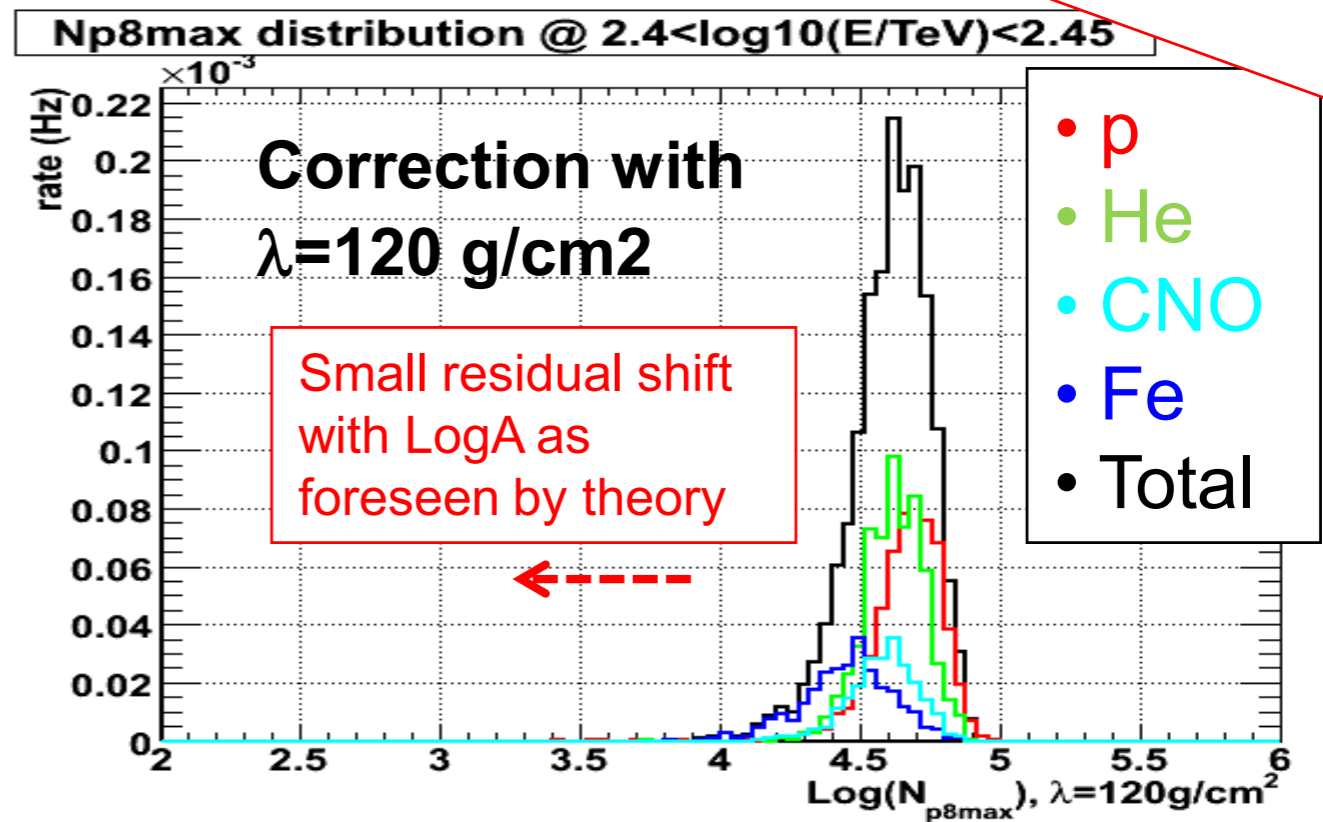
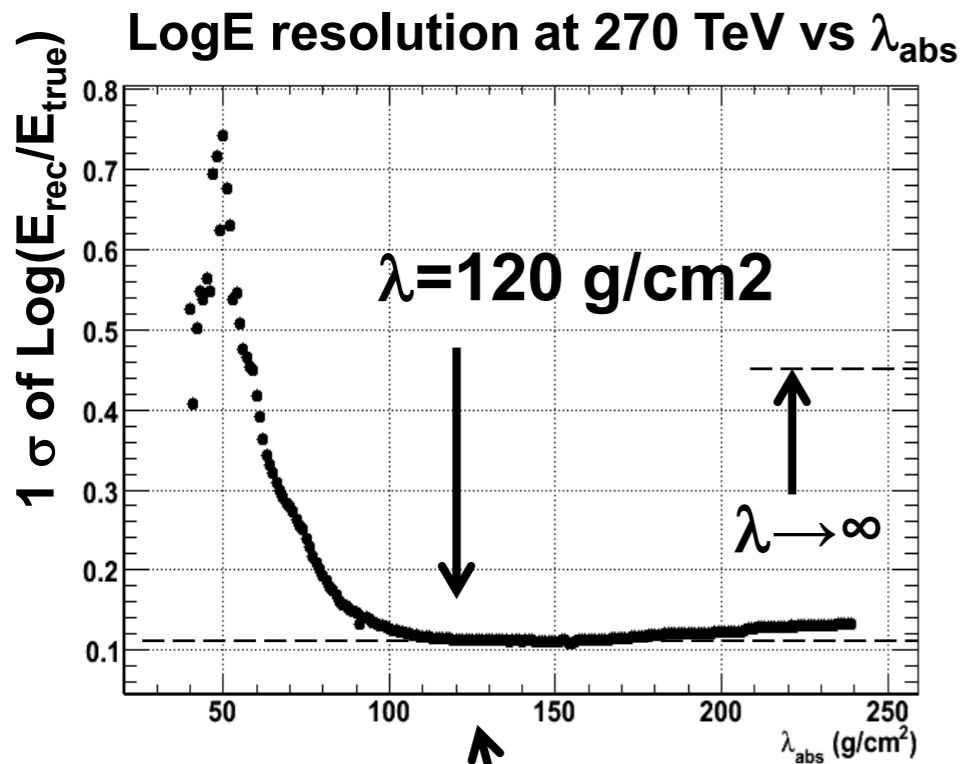
### G1 Gain Scale (100 - 1000) TeV

- 75 days (290-365)  
2010
- 830 Files

# Finding the best $\lambda_{\text{abs}}$ parameter



Further improvements in progress

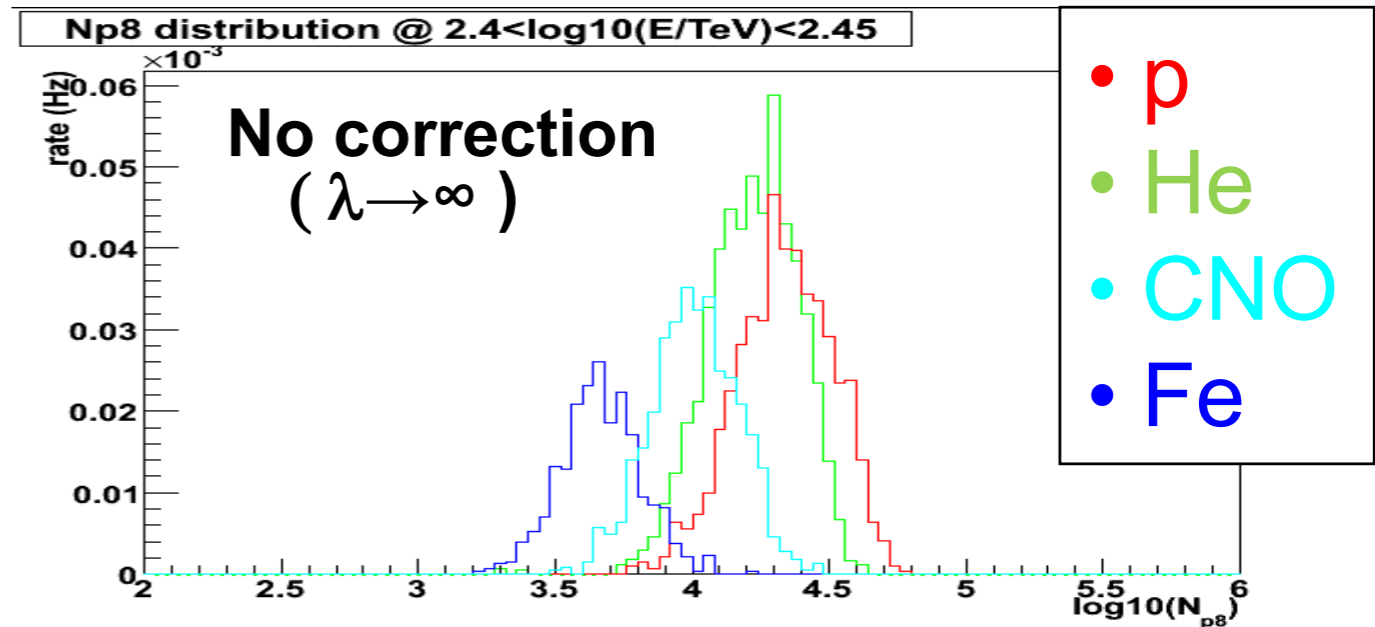


Results from the ARGO-YBJ test experiment

Astroparticle Physics 17 (2002) 151–165

According to numerous measurements from sea level to an altitude of about 4 km,  $A_{\text{att}}$  lies between 120 g/cm<sup>2</sup> and 150 g/cm<sup>2</sup> for showers with moderate size [15,19].

The parameter  $\alpha$  is found to be  $4.88 \pm 0.45$ , so that  $A_{\text{att}} = (124 \pm 11) \text{ g/cm}^2$ , in excellent agreement with previous results. For comparison, the value provided by Monte Carlo simulations is  $4.11 \pm 0.37$ .



# Trigger and selection efficiencies for the p+He measurement

