

PIERRE  
AUGER  
OBSERVATORY



Università  
di Catania



*La fisica delle astroparticelle nell'ambito  
dell'Osservatorio Pierre Auger :  
principali risultati e prospettive future*

---

**Gioacchino Alex Anastasi**  
on behalf of the Pierre Auger Collaboration

*Incontri di Fisica delle Alte Energie  
Catania, 12 Aprile 2023*

# L'Osservatorio Pierre Auger

Il più grande esperimento per la misura dei raggi cosmici di altissima energia !

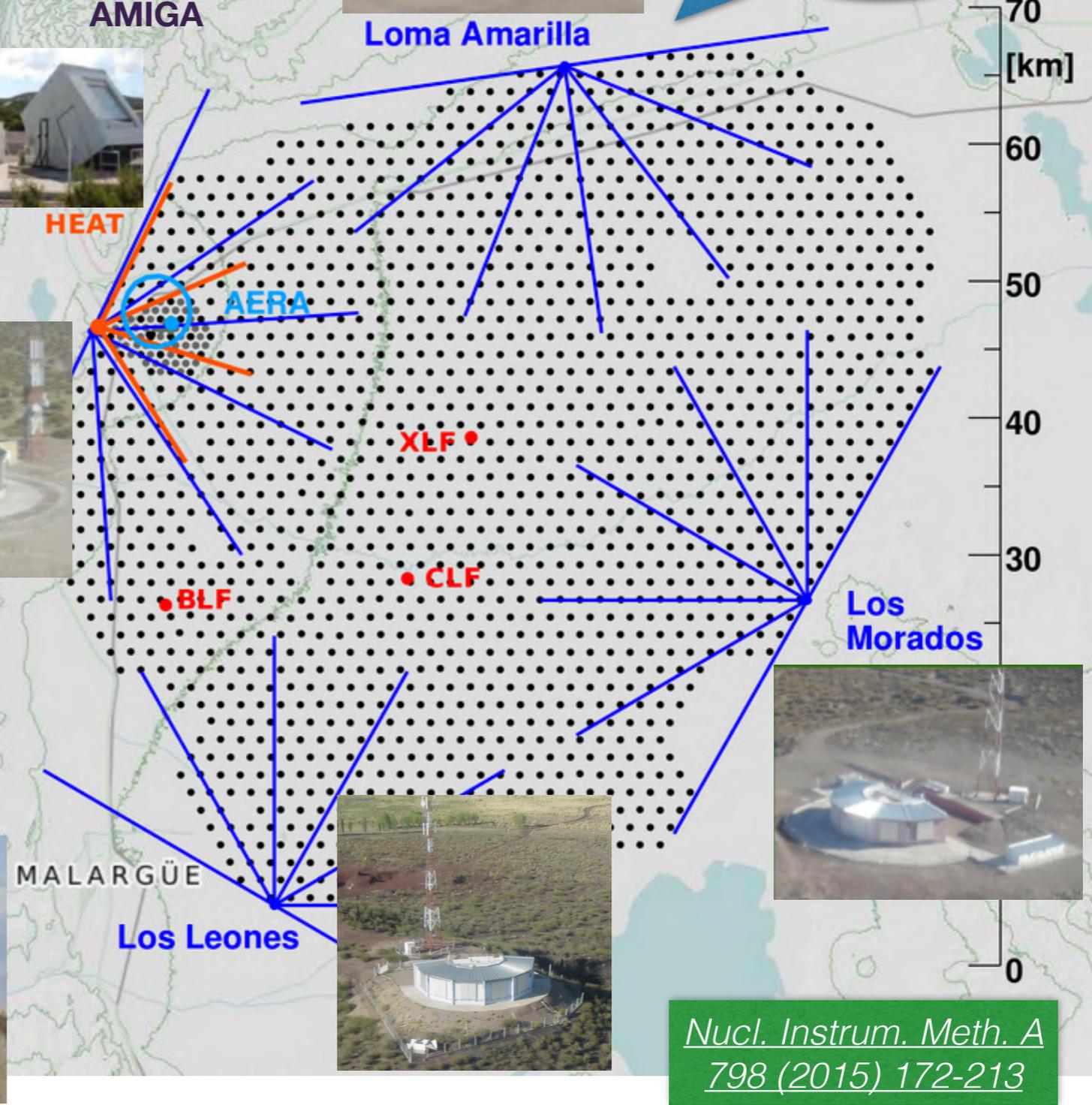


Malargue, Argentina

**Rivelatore di superficie (SD)**  
 Griglia triangolare di oltre 1600 rivelatori Cherenkov ad acqua (WCD) su un'area di ~3000 km<sup>2</sup>

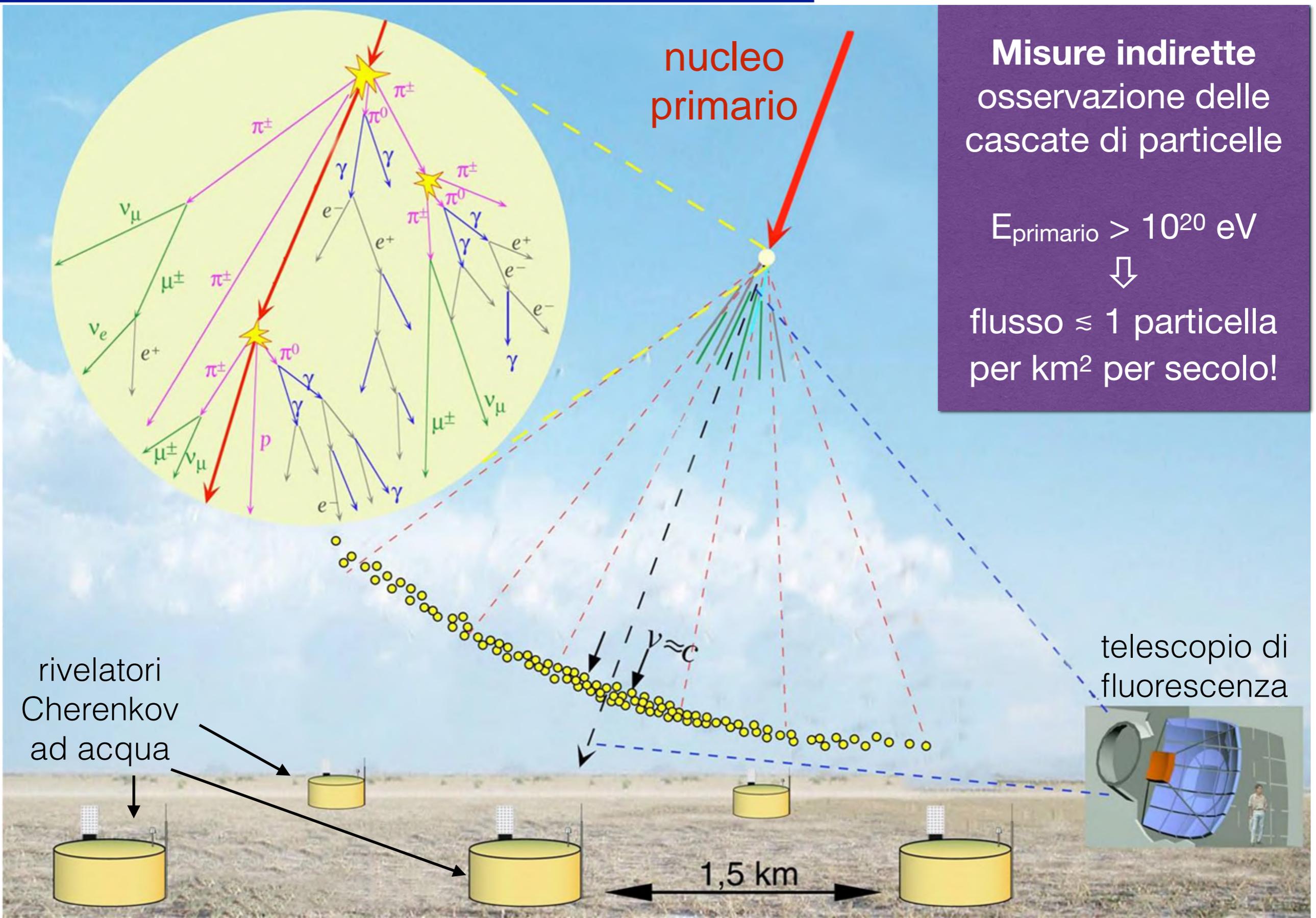
**Rivelatore di fluorescenza (FD)**  
 24 telescopi di fluorescenza in 4 edifici per osservare l'atmosfera ad elevazioni 0°-30°

*Numerosi enhancements*  
 (Infill, HEAT, AERA, AMIGA, ...)



Nucl. Instrum. Meth. A  
 798 (2015) 172-213

# Sciami estesi in aria



**Misure indirette**  
osservazione delle cascate di particelle

$E_{\text{primario}} > 10^{20} \text{ eV}$   
↓  
flusso  $\approx 1$  particella per  $\text{km}^2$  per secolo!

# Rivelazione ibrida

Osservazione di uno sciame  
**contemporaneamente**  
con i rivelatori di superficie  
e con i telescopi di fluorescenza

Misura della densità di  
particelle al suolo  
*duty-cycle* ~100%

Misura dello sviluppo in  
atmosfera dello sciame  
*duty-cycle* ~ 15%

# Calibrazione in energia

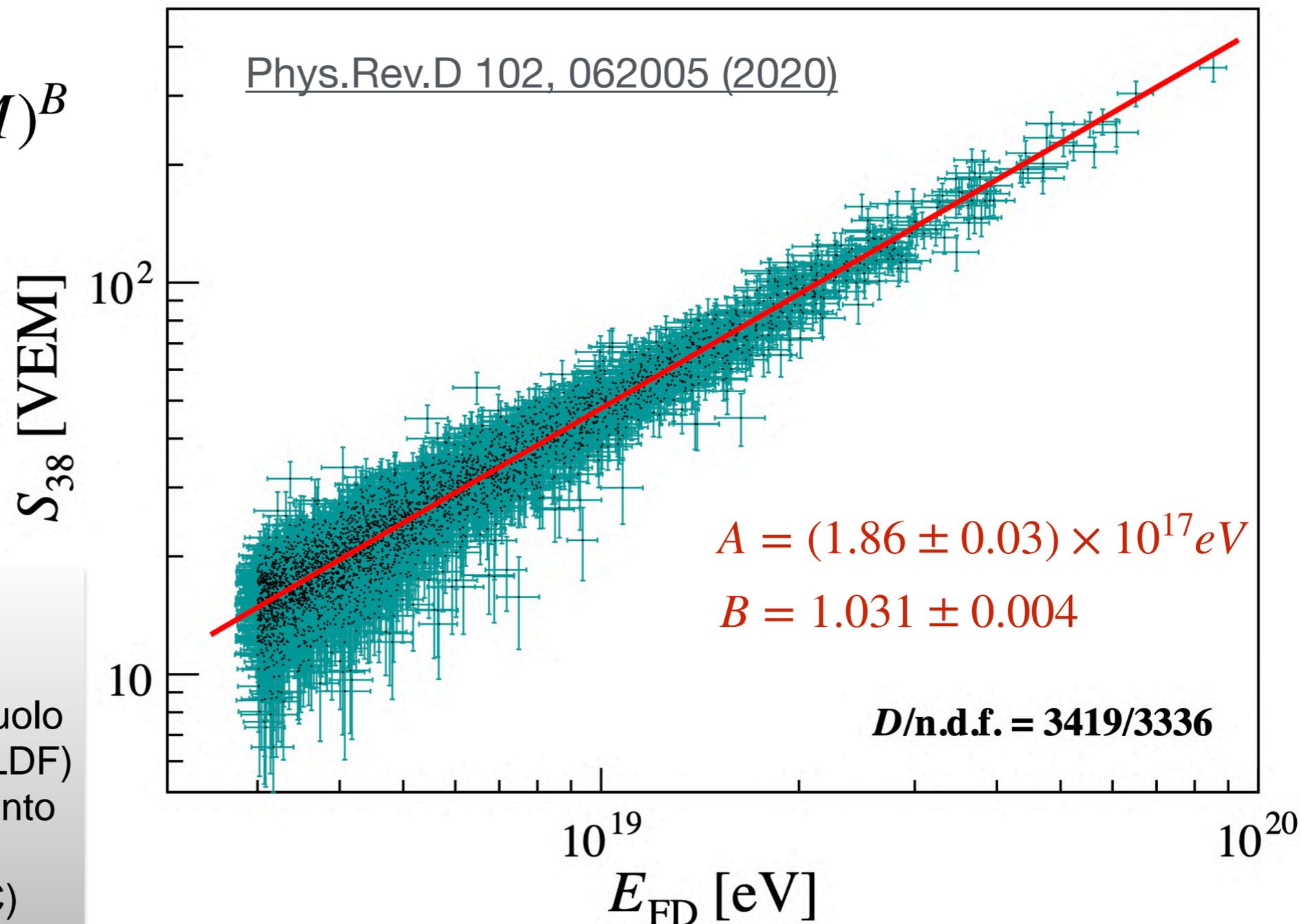
**Golden Hybrids** : eventi ibridi nei quali è possibile ricostruire sia l'energia del primario con le misure di fluorescenza ( $E_{FD}$ ) sia la distribuzione laterale (*Lateral Distribution Function*, LDF) con il rivelatore di superficie.

$$E_{SD} = A(S_{38}/VEM)^B$$

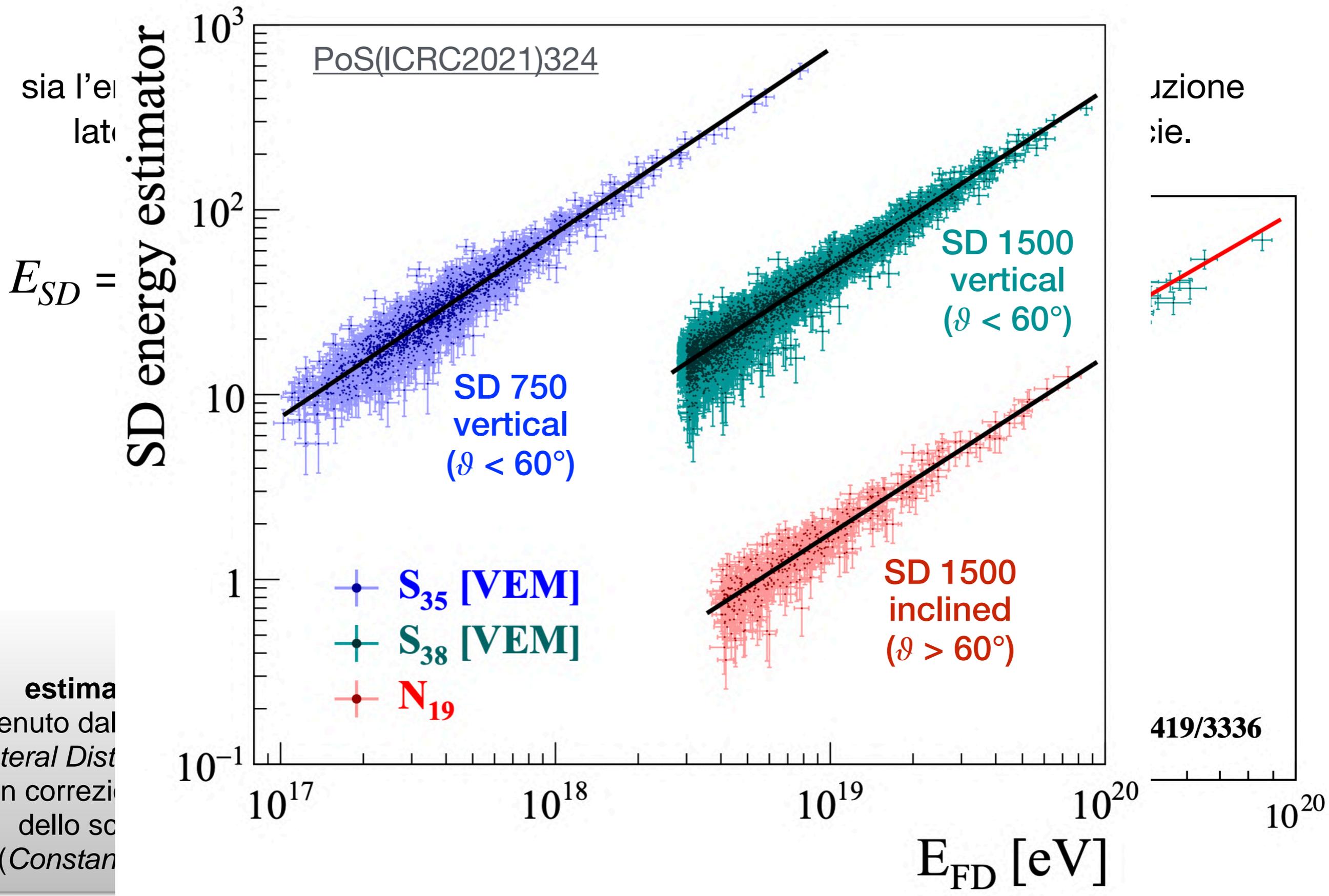
**S<sub>38</sub>**

**estimatore dell'energia**

ottenuto dal fit dei segnali al suolo (*Lateral Distribution Function*, LDF) con correzioni per l'assorbimento dello sciame in atmosfera (*Constant Intensity Cut*, CIC)



# Calibrazione in energia



sia l'energia  
laterale

calibrazione  
in energia.

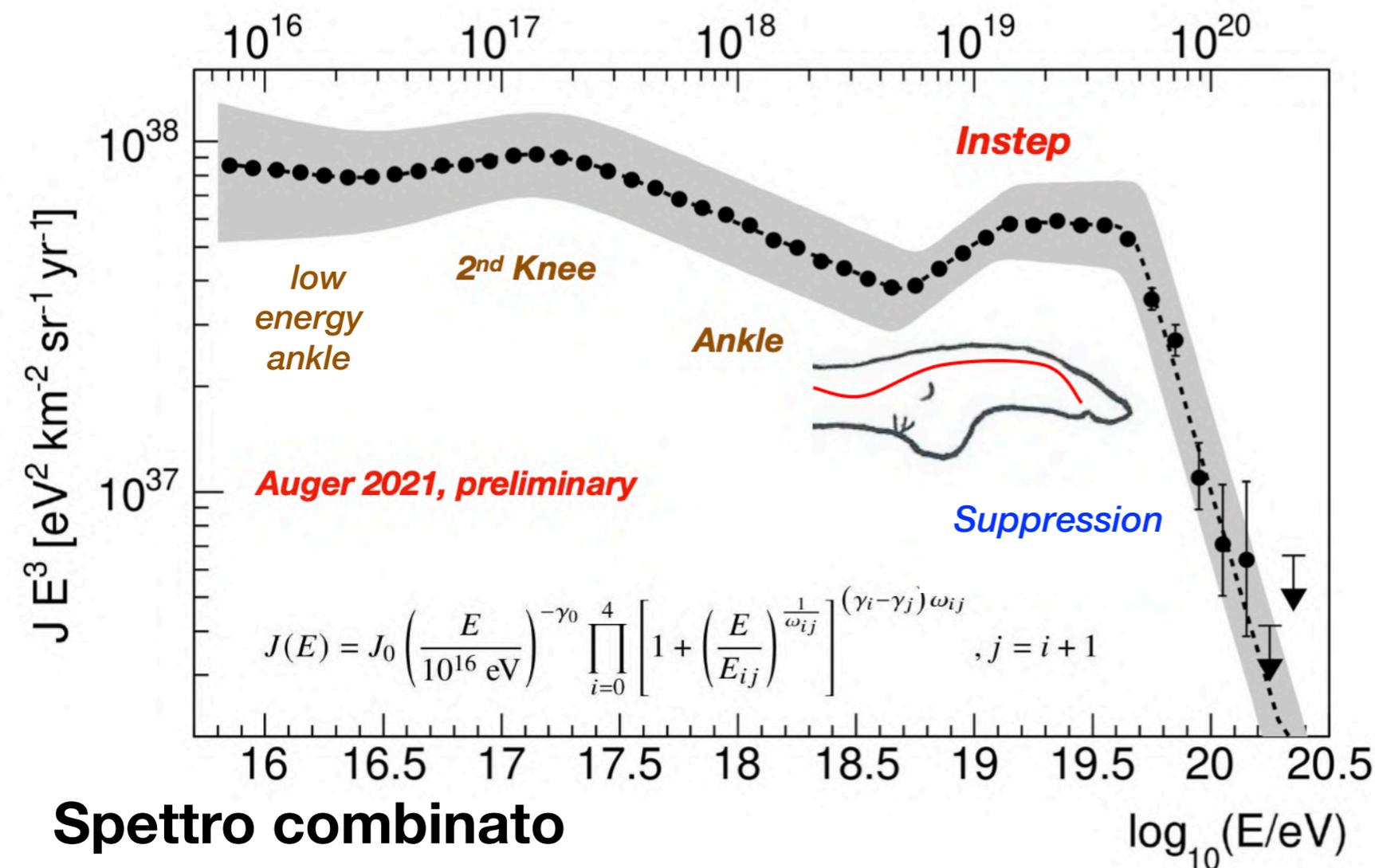
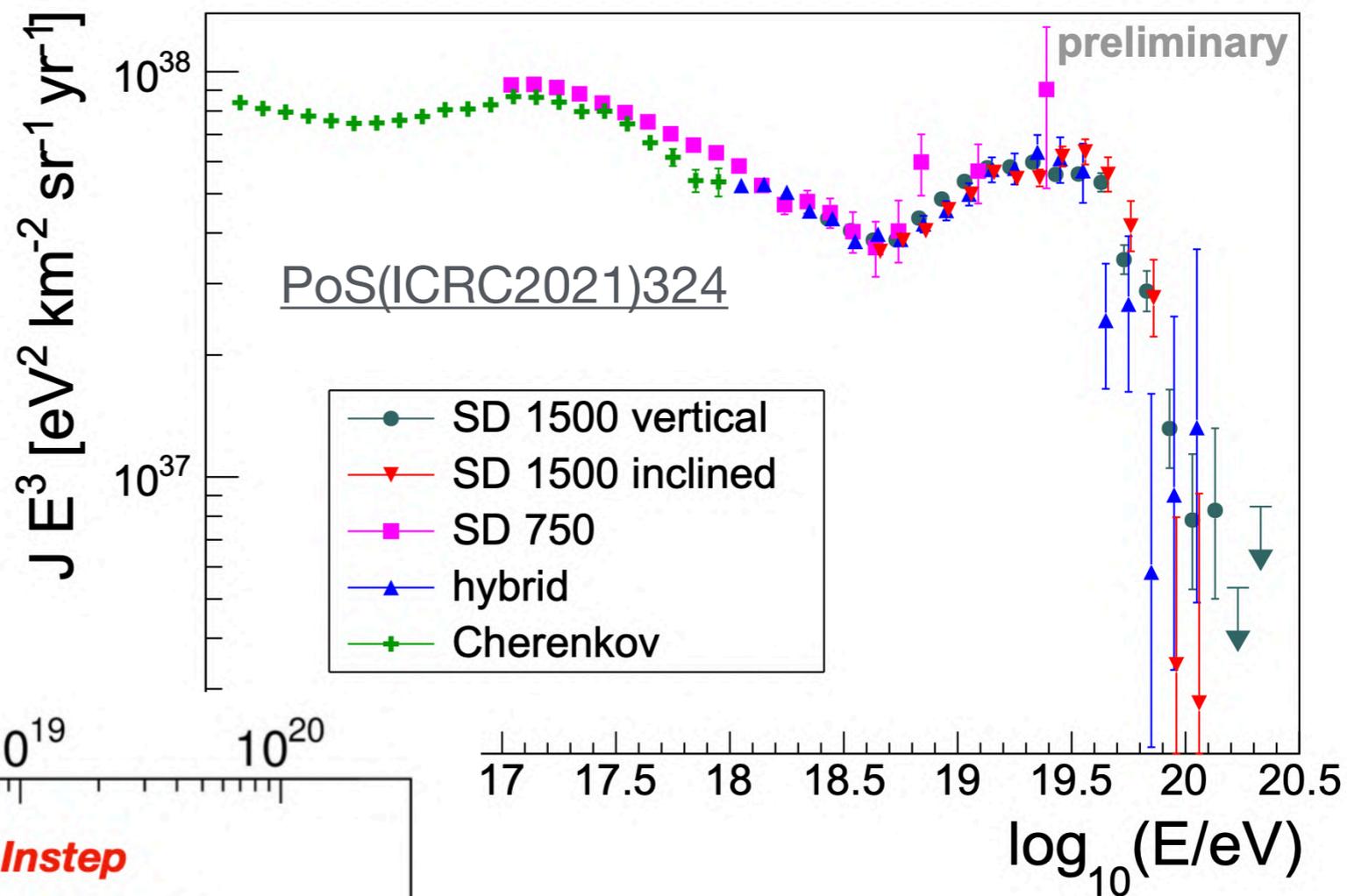
energia  
ottenuta dal  
(Lateral Dist  
con correzione  
dello sc  
(Constant

# Spettro energetico

**Stessa scala in energia :**

l'intero apparato è calibrato rispetto al rivelatore di fluorescenza (nessun utilizzo di simulazioni!)

**Incertezza complessiva dominata proprio dalla sistematica (14%) sulla scala in energia**



Parametrizzazione con 6 leggi di potenza raccordate

**Alle più alte energie :**

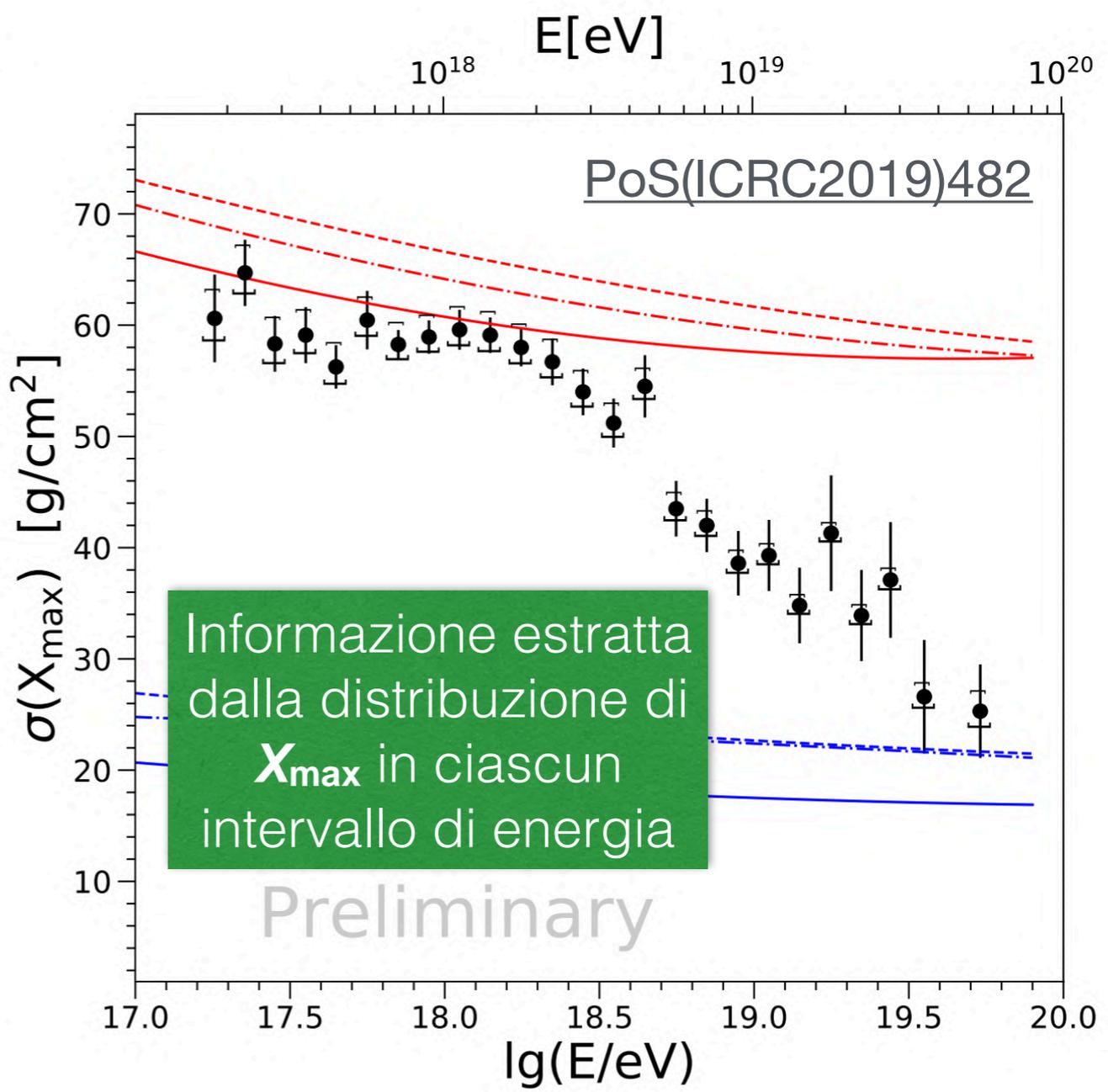
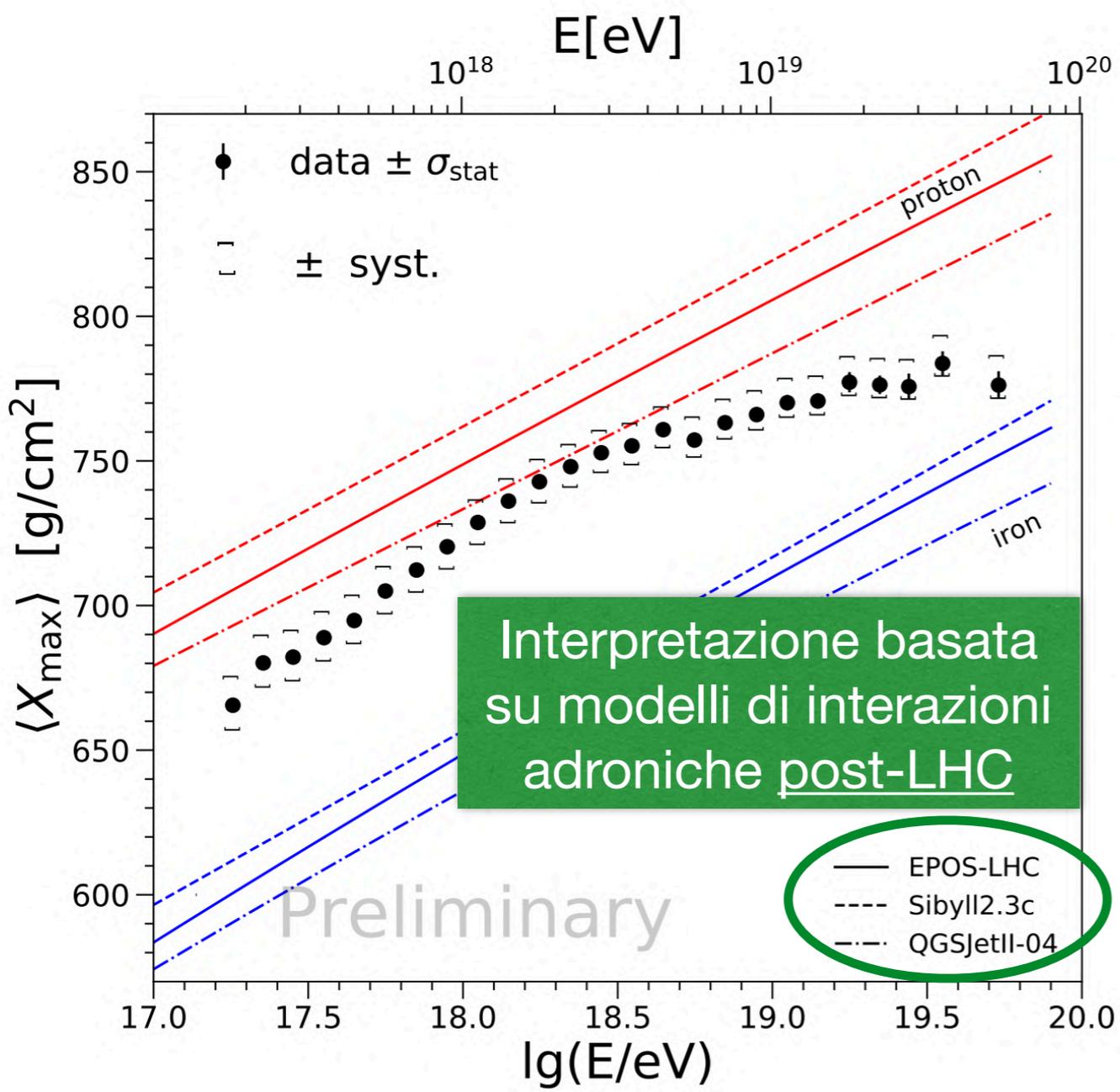
- Caviglia (*ankle*) ~ 5 EeV
- Flesso (*instep*) ~ 13 EeV  
*new feature !*
- **Soppressione** sopra ~ 46 EeV

[Phys.Rev.D 102, 062005 \(2020\)](https://arxiv.org/abs/2006.06205)

**Spettro combinato**

# Composizione in massa

Osservabile correlata alla massa del primario :  $X_{\max}$   
 profondità atmosferica del massimo nello sviluppo dello sciame



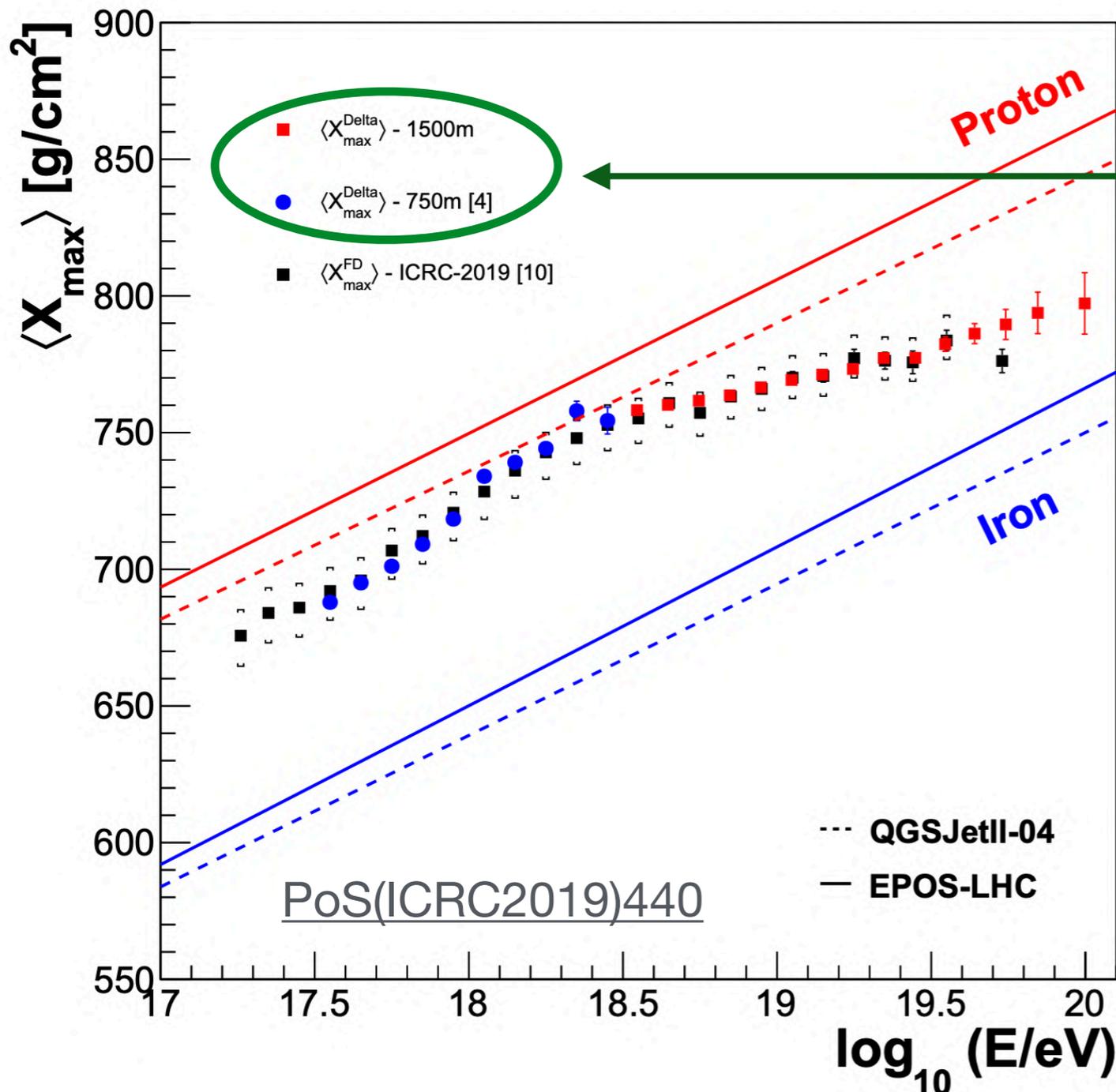
**Risultato : nuclei primari gradualmente più pesanti per  $E \gtrsim 10^{18.3}$  eV**

# Composizione in massa

Misurata tramite tecnica di fluorescenza  $\rightarrow$  **duty-cycle solo del  $\sim 15\%$**



Ricerca di nuove tecniche basate sulle misure del rivelatore di superficie  
(**duty-cycle  $\sim 100\%$** )



**Delta-method**

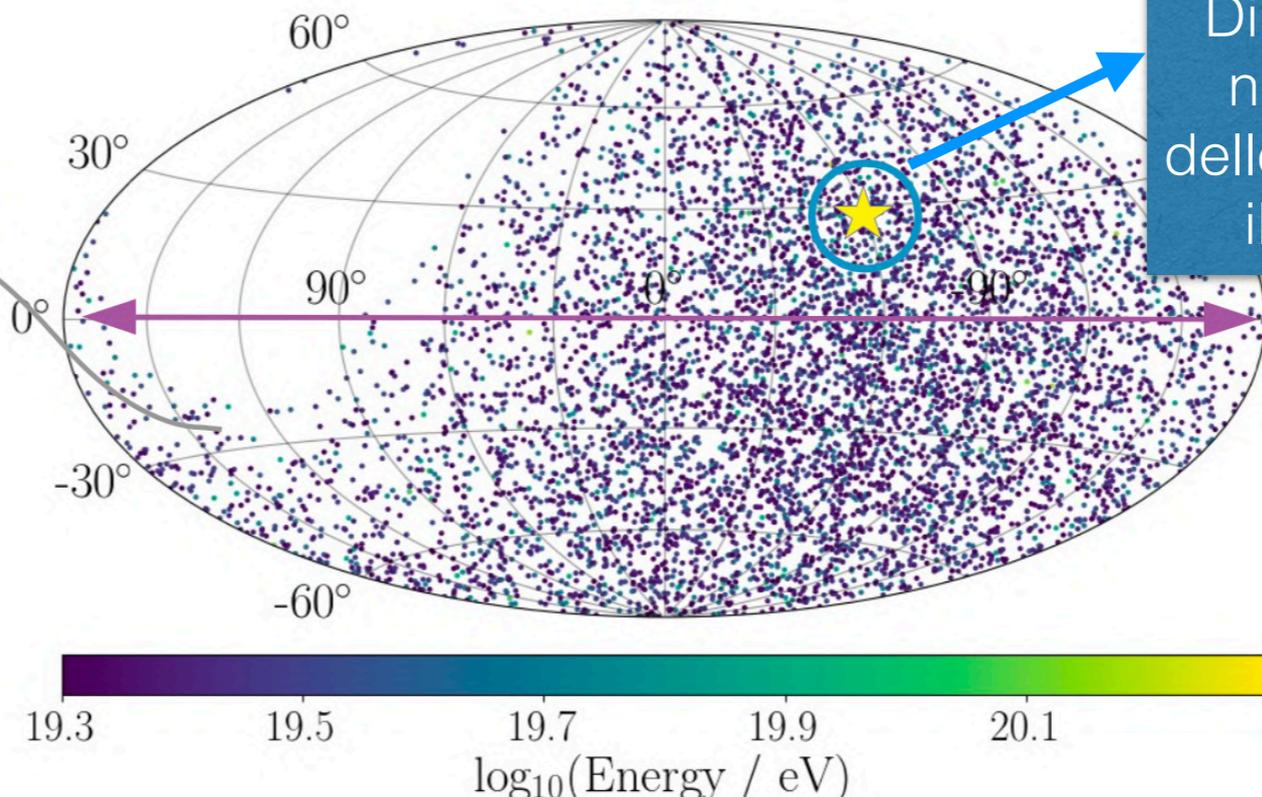
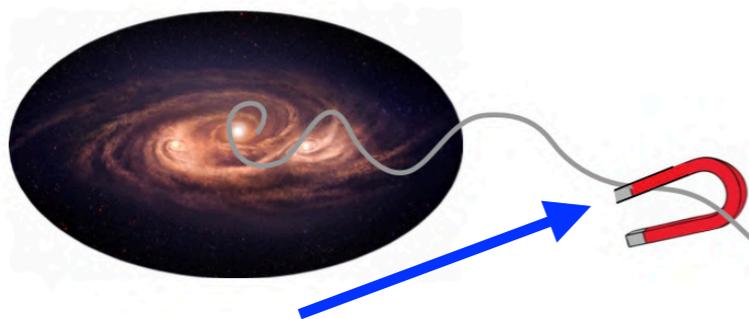
(calibrato rispetto a  $X_{\max}^{\text{FD}}$ )

[Phys. Rev. D 96 \(2017\) 122003](#)

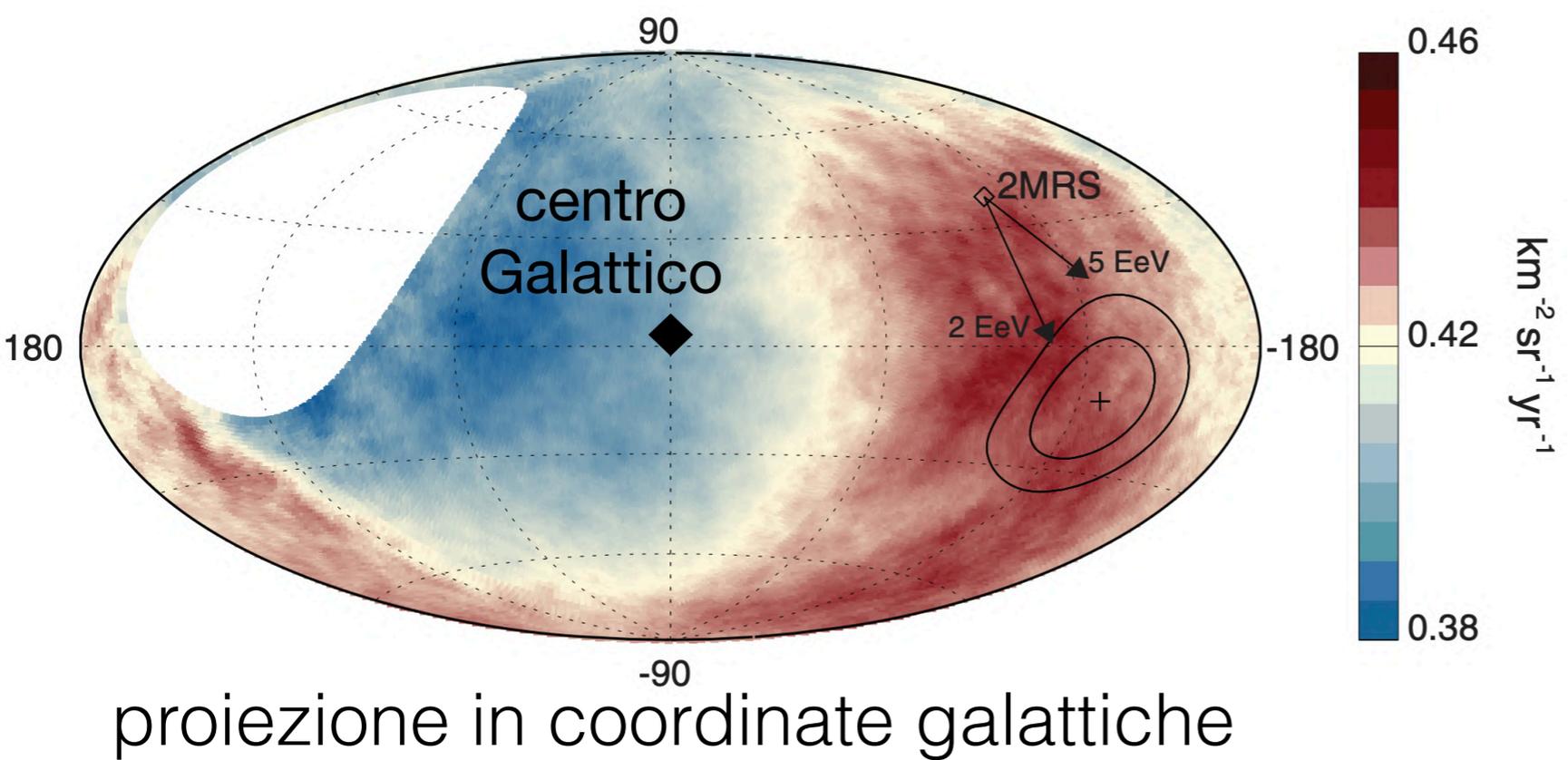
Nuove analisi tramite algoritmi  
di *Machine Learning*  
[JINST 16 \(2021\) P07019](#)

**Prossimo passo : upgrade  
del rivelatore (AugerPrime)**

# Direzioni di arrivo - anisotropie su larga scala



Science 357 (2017) 1266-1270  
 Astrophys. J. 868 (2018) 4  
 PoS(ICRC2021)335



**Anisotropia**  
 per  $E > 8 \times 10^{18}$  eV  
 con significatività  $> 6\sigma$

Tale eccesso punta a circa  $125^\circ$  dal centro Galattico

↓

probabile origine extra-galattica per i raggi cosmici di energia estrema

# Il futuro dell'Osservatorio: AugerPrime

## Installazione di nuovi apparati nel rivelatore di superficie !

- In ciascun rivelatore Cherenkov ad acqua :  
**Small PMT + Surface Scintillator Detector +  
Radio Antenna + nuova elettronica**  
(Upgraded Unified Board)
- completamento di una griglia di *Underground  
Muon Detectors* su un'area di  $\sim 30 \text{ km}^2$   
(distanza reciproca tra stazioni di 750m)

### Obiettivo principale: determinazione della composizione in massa alle energie estreme

- ➔ origine della soppressione
- ➔ anisotropie in funzione della carica
- ➔ studio delle interazioni adroniche  
(energie molto superiori a quelle  
raggiungibili negli acceleratori)



Auger Preliminary Design Report [arXiv:1604.03637]

A. Castellina, EPJ Web of Conf.210 (2019) 06002

# Conclusioni

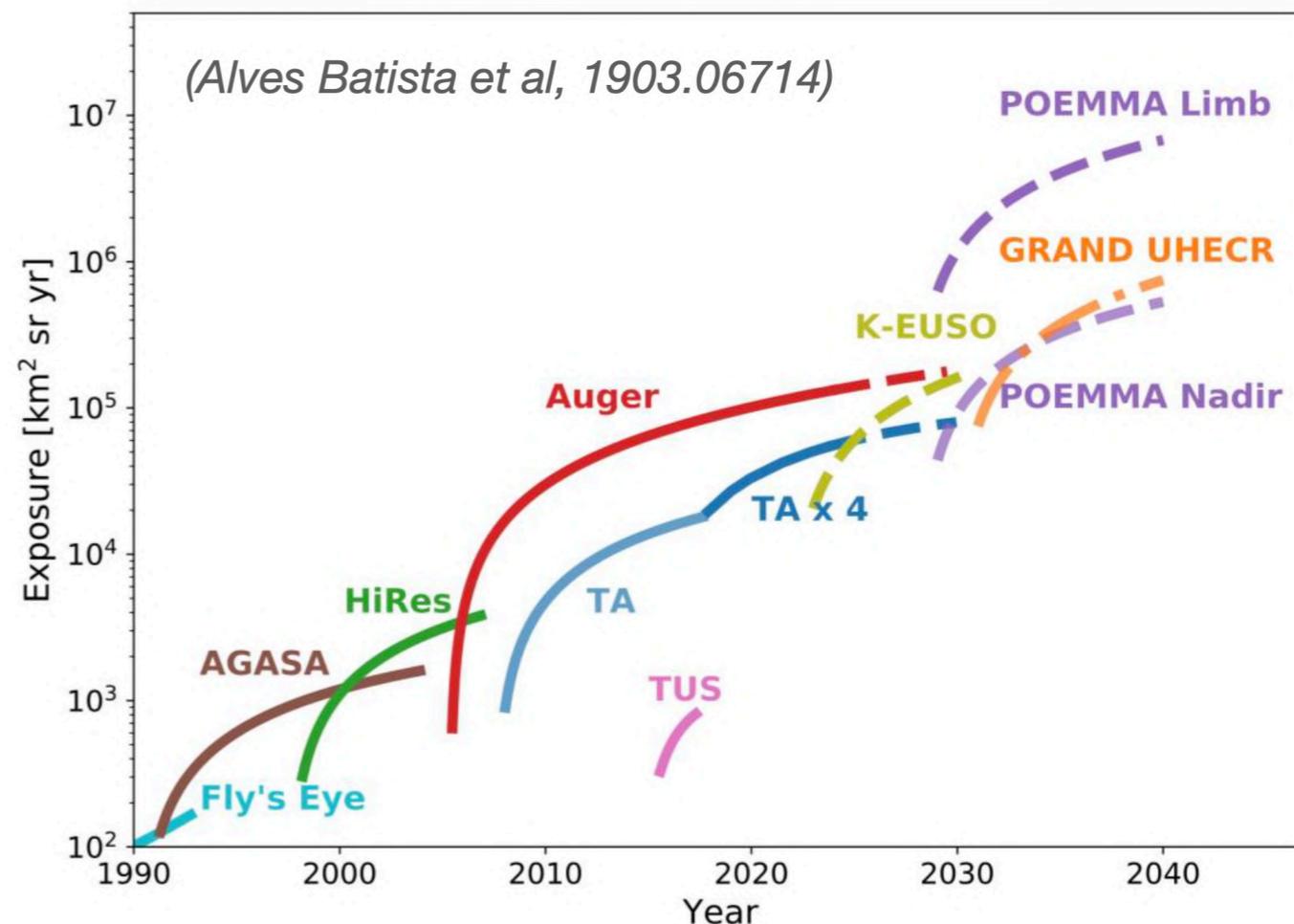
Molti risultati non trattati in questa presentazione, come :

- deficit della componente muonica nei modelli di interazioni adroniche ([paper1](#), [paper2](#), [paper3](#))
- ricerca di [fotoni](#) e [neutrini](#) alle altissime energie
- anisotropie rispetto a cataloghi di sorgenti ([paper](#), [proceeding](#))
- [elfi](#) e altri fenomeni dell'alta atmosfera
- ...

**E la storia non finisce qui !**

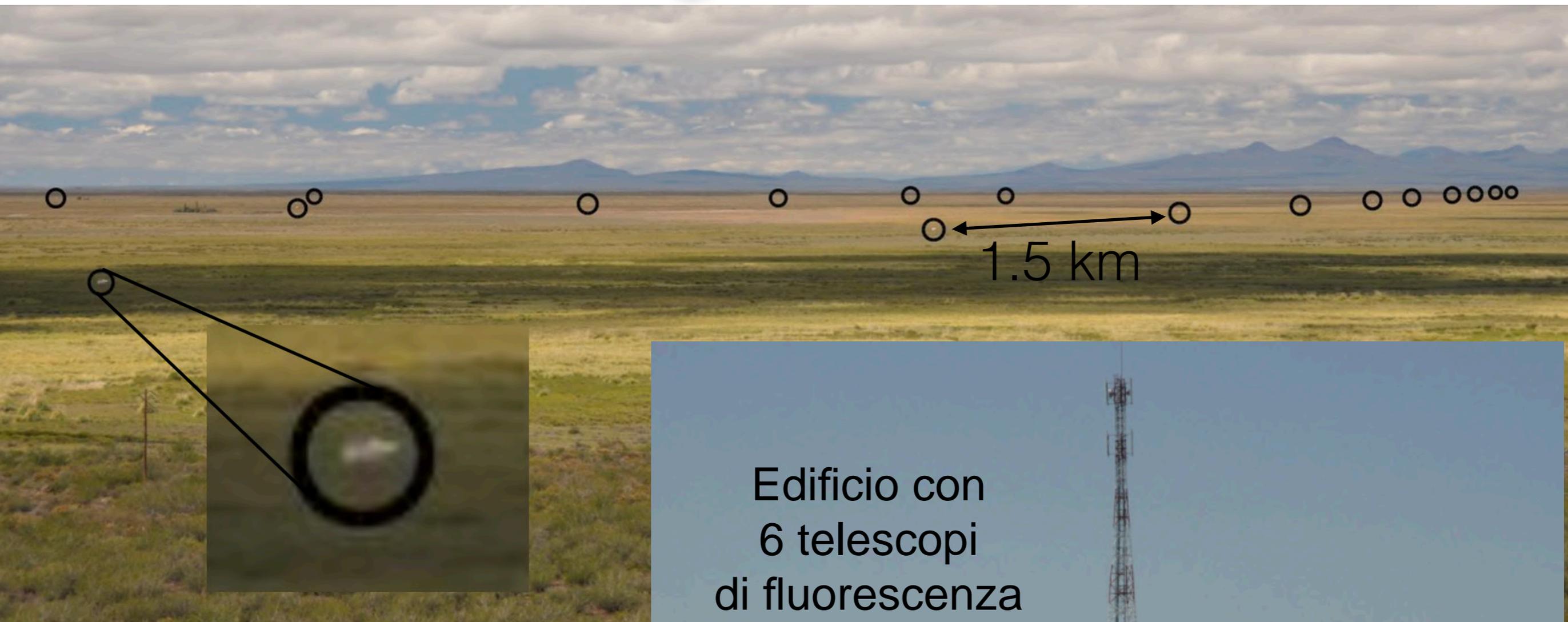
**AugerPrime** : sensibilità alla composizione in massa per raggi cosmici con  $E > 4 \times 10^{19}$  eV

- ★ Installazione e messa in funzione da completare a metà 2023
- ★ Raccolta dati continua oltre il 2030
- ★ Risultati fondamentali per la nuova generazione di esperimenti



**Backup**

# L'Osservatorio Pierre Auger



Edificio con  
6 telescop  
di fluorescenza

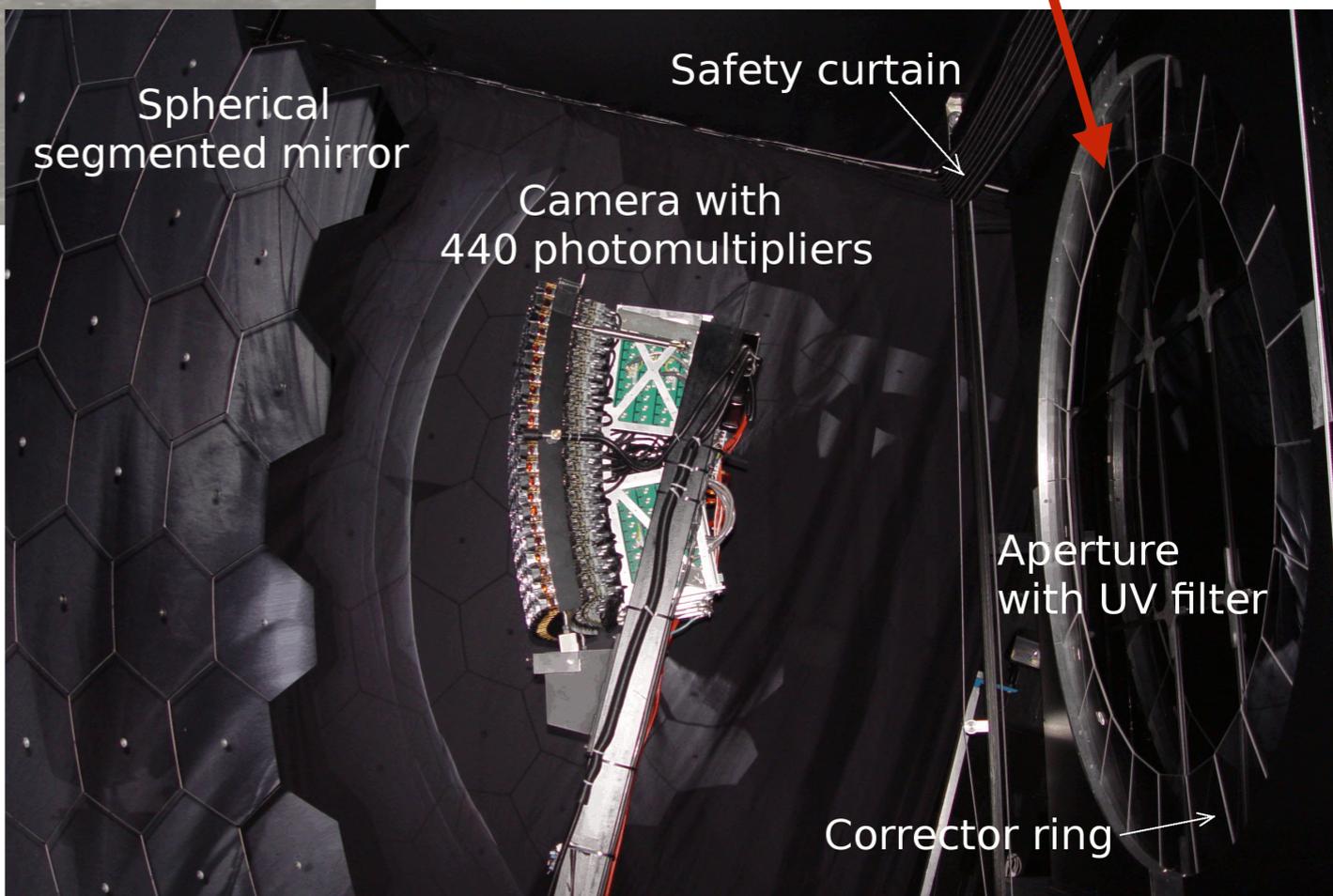
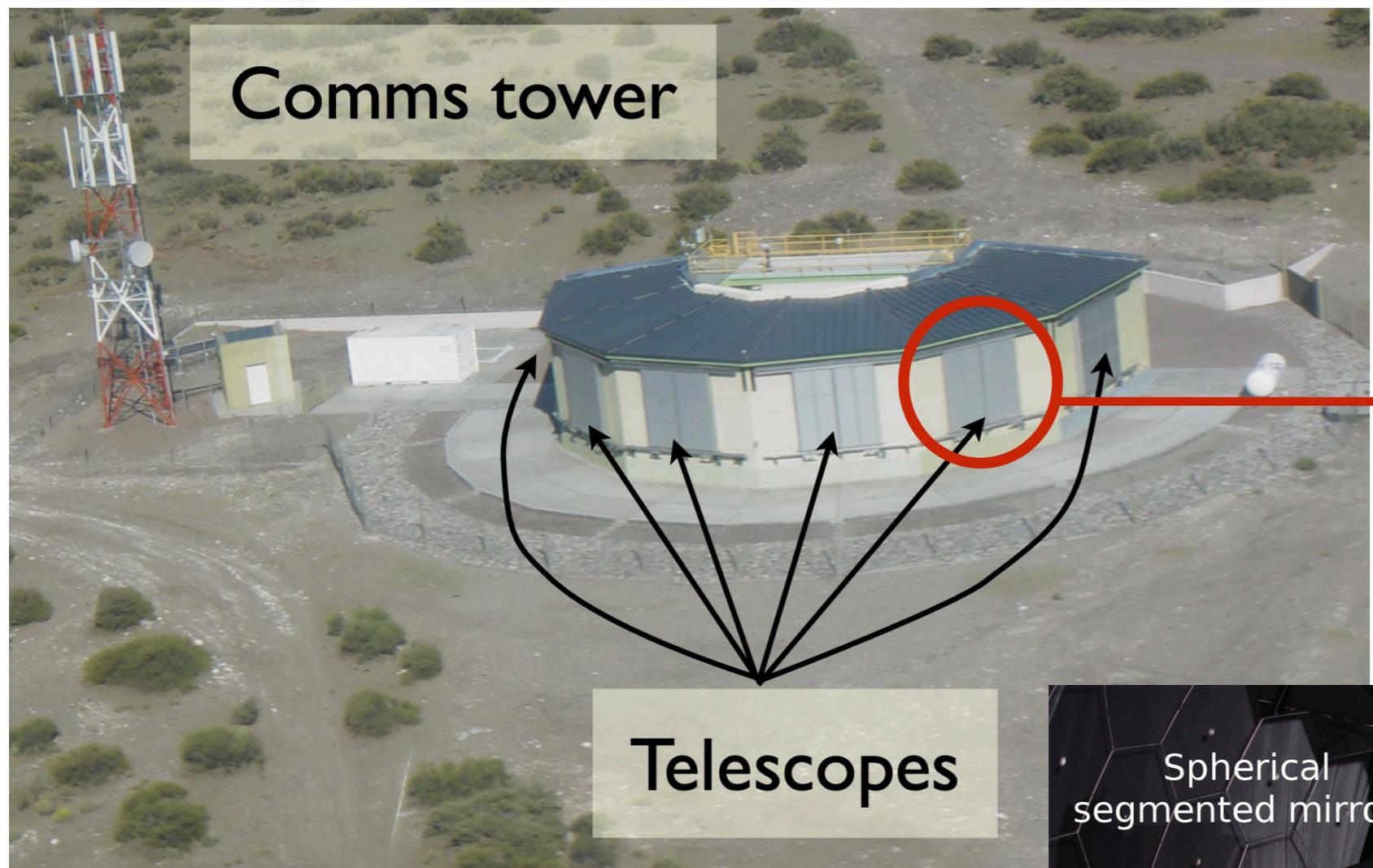


rivelatore  
Cherenkov  
ad acqua



Main Building, Malargue

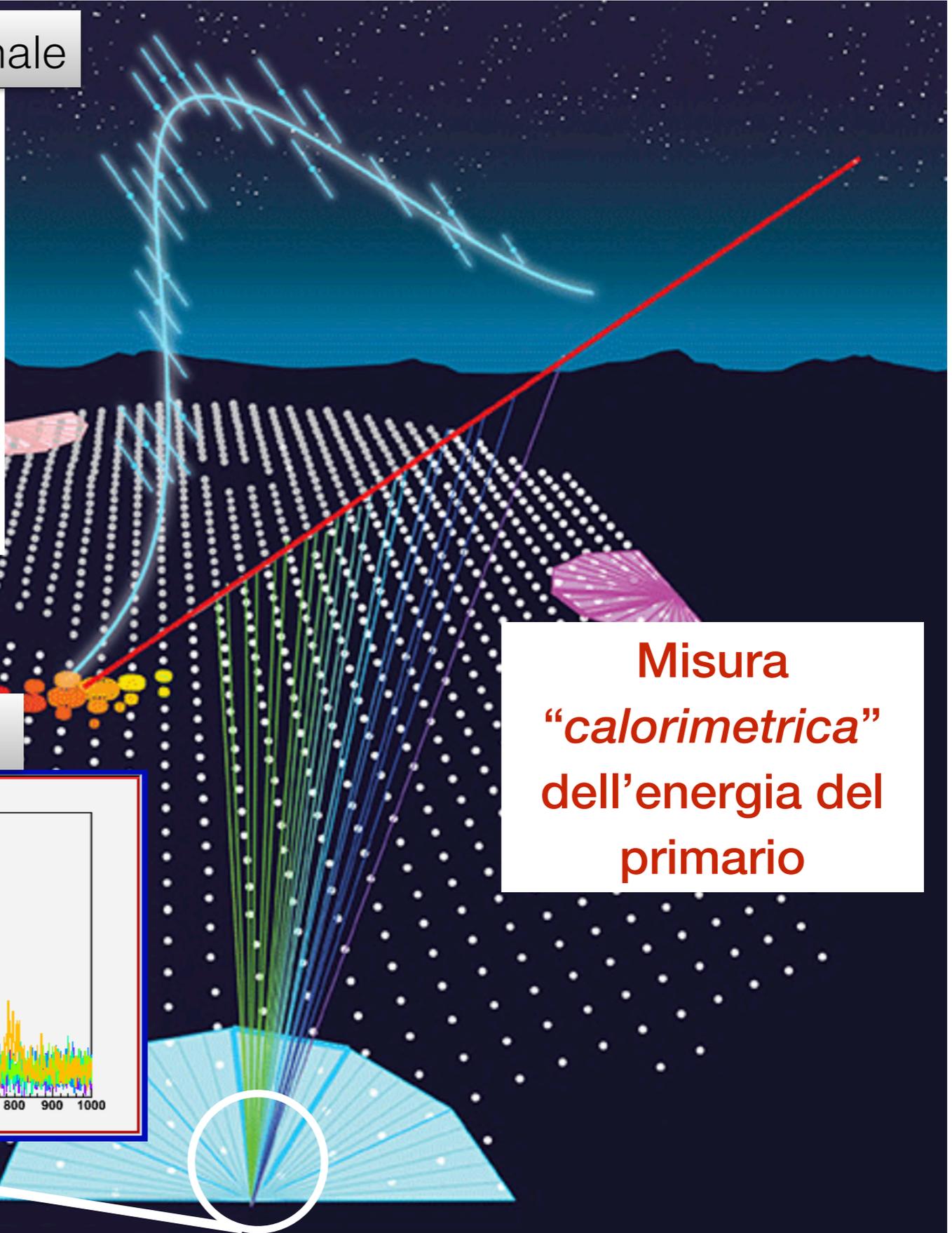
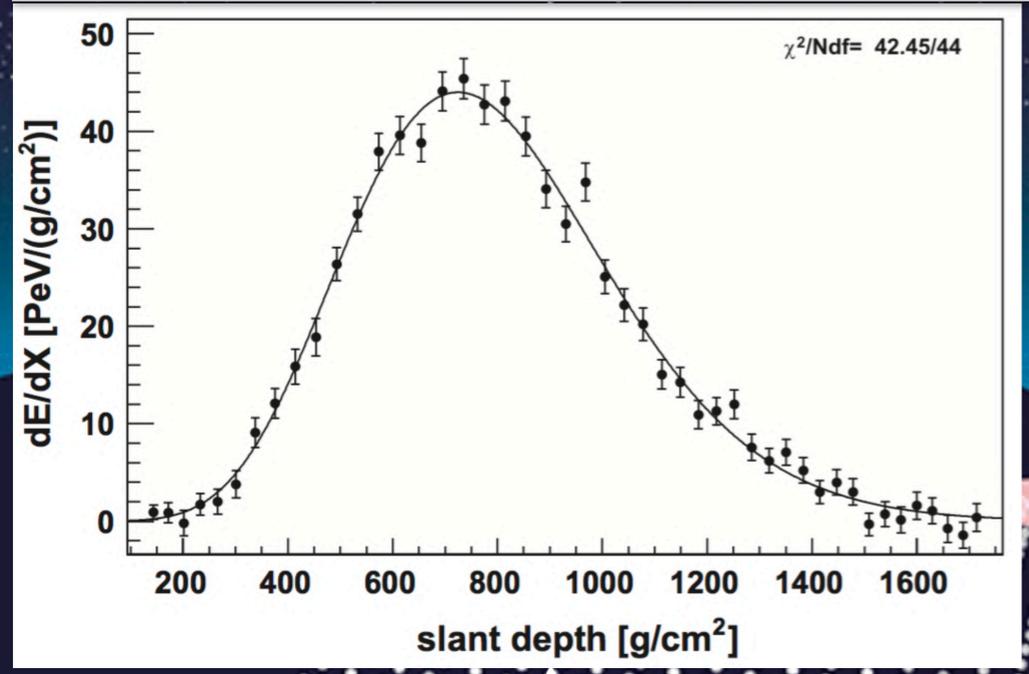
# Telescopi di fluorescenza



Osservazioni possibili solo  
in **notti serene e senza luna**  
(circa il 15% del tempo)

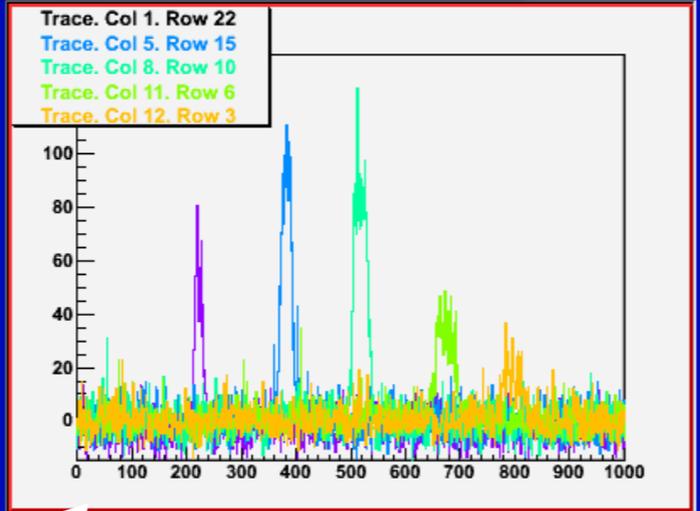
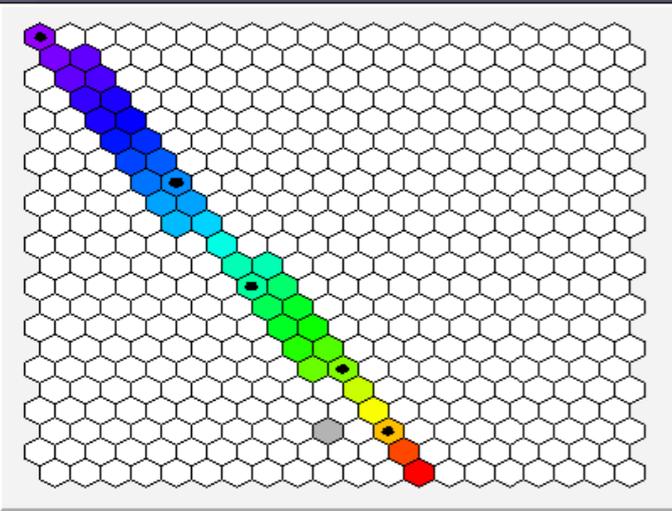
# Rivelazione ibrida - misure di fluorescenza

Ricostruzione del profilo longitudinale

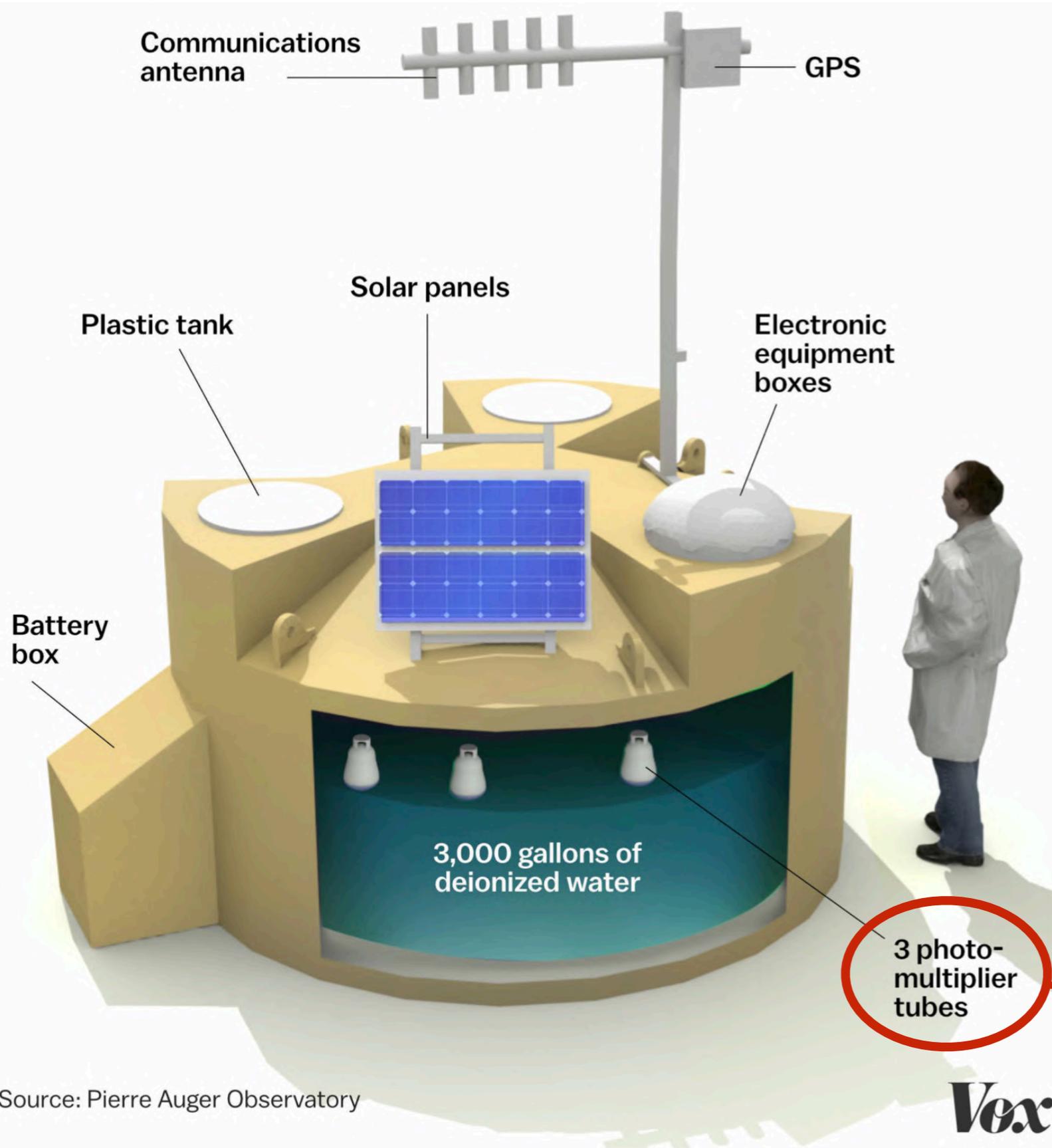


Misura  
"calorimetrica"  
dell'energia del  
primario

Misure dei rivelatori di fluorescenza



# Rivelatore Cherenkov ad acqua



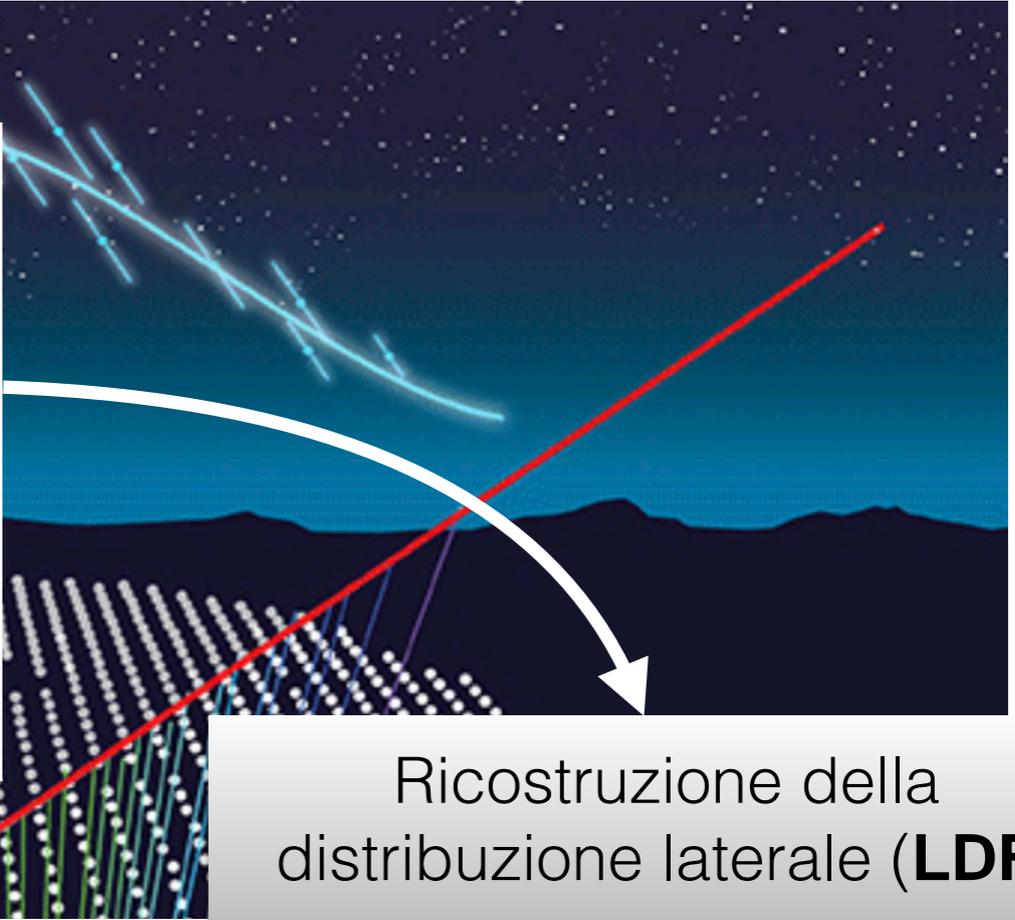
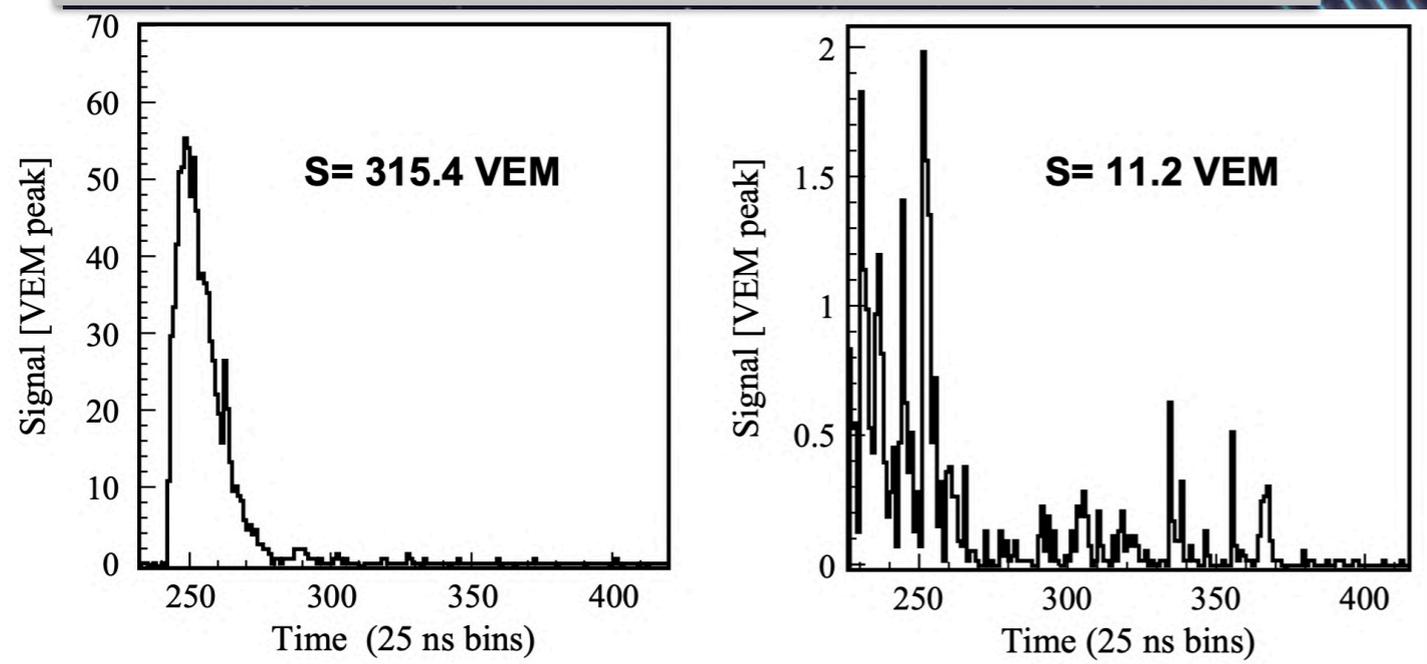
Ciascun rivelatore contiene **12mila litri di acqua ultra-pura** (diametro 3.6m, altezza 1.2m) costantemente osservata da **tre tubi fotomoltiplicatori da 9 pollici**.

**Ciascuna stazione è autonoma**, dotata di un pannello solare e di un'antenna per la trasmissione wireless dei dati.

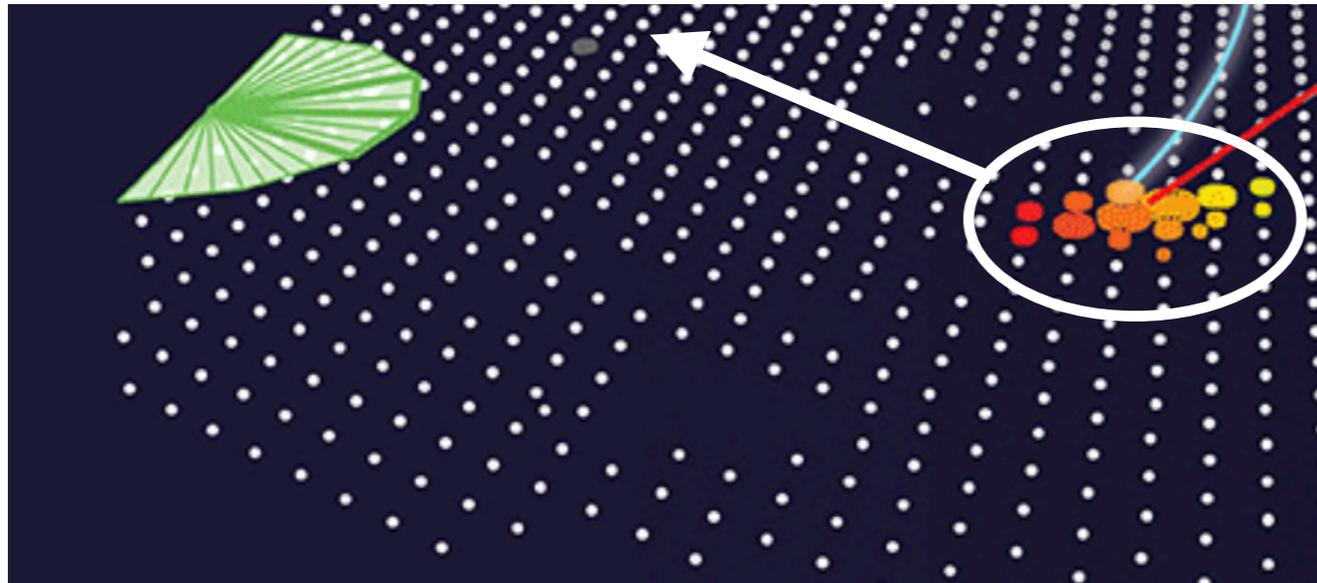


# Rivelazione ibrida - misure al suolo

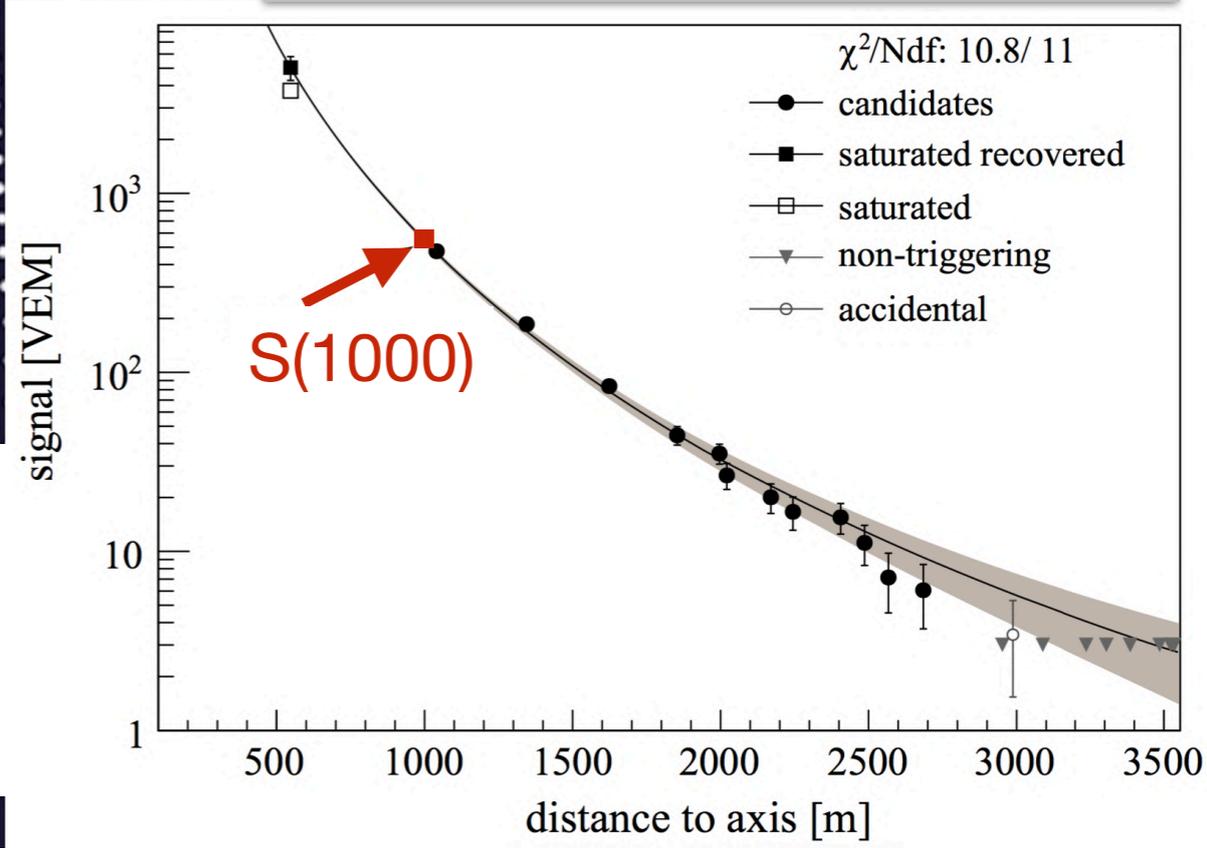
Misure dei rivelatori Cherenkov ad acqua



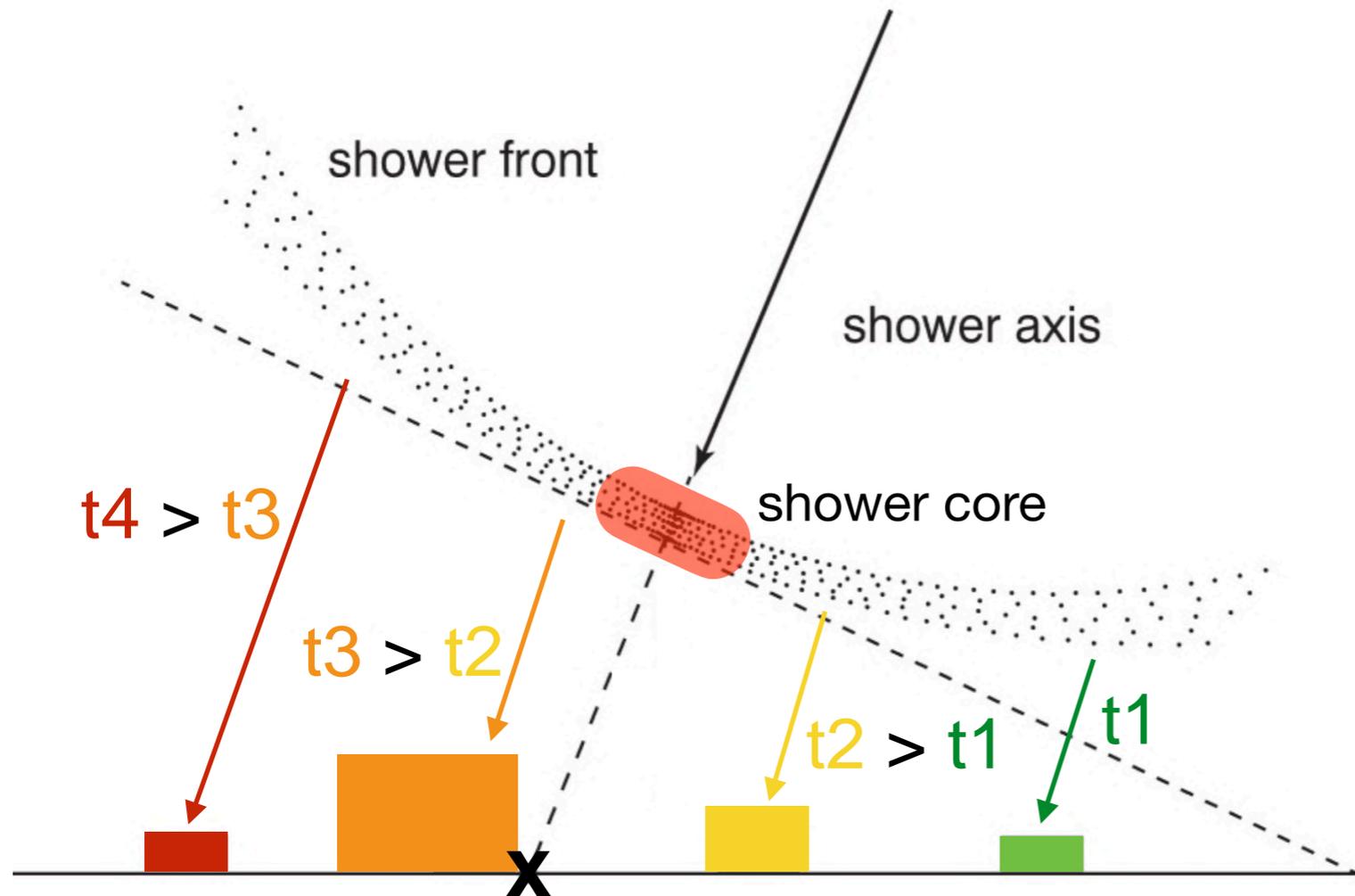
Ricostruzione della distribuzione laterale (**LDF**)



**S(1000)** : segnale (interpolato) a 1000 m dall'asse dello sciame.  
**Estimatore** (in prima approssimazione) dell'energia del primario



# Ricostruzione delle caratteristiche dello sciame



Lo sciame si propaga in atmosfera con un **fronte approssimativamente sferico**.

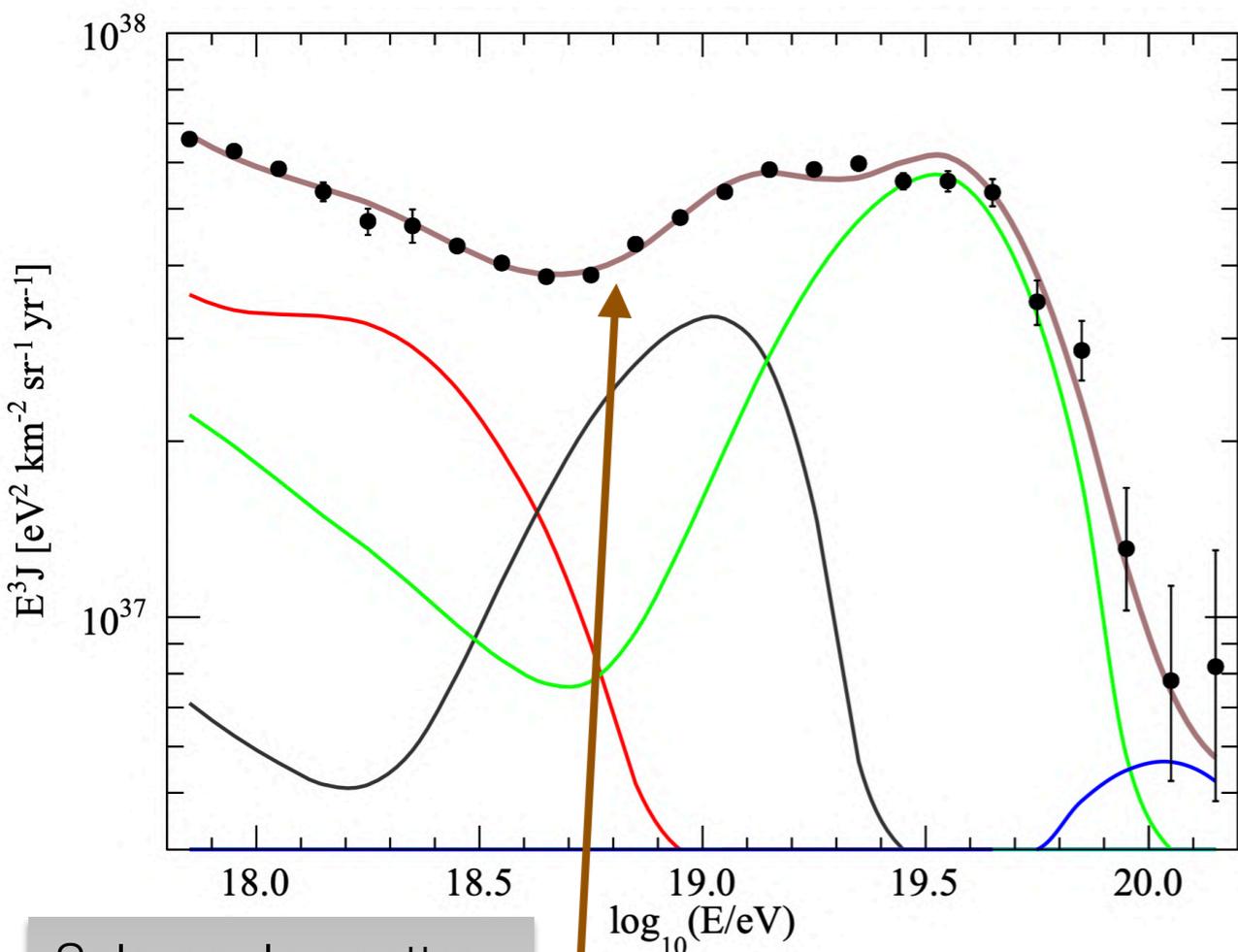
La densità di particelle secondarie è molto superiore nel *core* della cascata, e diminuisce allontanandosi dall'asse dello sciame.

Ciascuna stazione sarà raggiunta in un tempo diverso e da una quantità di particelle più o meno grande



Con le misure del rivelatore di superficie è possibile ricostruire il **punto di impatto al suolo del *core*** e quindi la **direzione del primario**

# Interpretazioni di spettro e composizione



Solo per lo spettro :  
 A = 1 (rosso),  
 2 ≤ A ≤ 4 (grigio),  
 5 ≤ A ≤ 22 (verde),  
 23 ≤ A ≤ 38 (ciano),  
 A ≥ 39 (blu)

Risultato del fit

Fit combinato di spettro e composizione con uno scenario astrofisico semplificato ( **PoS(ICRC2021)311** )

**sopra la caviglia** : componente extra-galattica emessa dalle sorgenti con composizione dominata da elementi di media massa, un basso *rigidity-cutoff* e un spettro molto *hard* ( $\gamma \sim 0$ )

**sotto la caviglia** : seconda componente extra-galattica con uno spettro *soft* e una composizione leggera (accoppiata a una componente Galattica in questo caso) o intermedia.

Risultato non definitivo a causa delle (grosse) sistematiche dovute alle incertezze: (i) nei modelli di interazione adronica; (ii) nelle interazioni dei primari nell'ambiente delle sorgenti; (iii) nella propagazione nello spazio extragalattico.

