

# Ricostruzione degli eventi rivelati con il rivelatore di superficie dell'Osservatorio Pierre Auger

Arcucci Cristian, Di Palma Andrea, Piezzo Giovanni

4AS, Liceo scientifico-linguistico statale-“V.Cuoco-T.Campanella”. Napoli

## ABSTRACT

I raggi cosmici, sono particelle ad alta energia provenienti dallo spazio. L'Osservatorio Pierre Auger, situato in Argentina, è uno degli strumenti più avanzati per l'osservazione di questi eventi, grazie alla combinazione di un rivelatore di superficie (SD) e di rivelatori di fluorescenza (FD). Il rivelatore di superficie è costituito da rivelatori Cherenkov ad acqua e fotomoltiplicatori. Quando le particelle dello sciame atmosferico entrano nell'acqua a velocità superiori alla velocità della luce, emettono luce Cherenkov che viene poi raccolta dai fotomoltiplicatori. Questo sistema consente di raccogliere dati cruciali per determinare l'energia, la direzione e la composizione delle particelle primarie. Viene inoltre mostrato l'evento a più alta energia mai misurato, un risultato che offre nuove prospettive sulla natura dei raggi cosmici e sulle loro origini.

## INTRODUZIONE[1]

In questo paragrafo introdurremo il concetto di raggi cosmici, l'osservatorio Auger, con particolare enfasi ai rivelatori di superfici e, poi, nei paragrafi successivi descriveremo l'argomento centrale del nostro lavoro.

I raggi cosmici sono particelle provenienti dallo spazio che colpiscono continuamente la Terra. Sono costituiti principalmente dai nuclei degli elementi comuni fino al ferro, e possono raggiungere energie estremamente elevate. Scoperti nel 1912, sono stati fondamentali per la fisica delle particelle negli anni 30' e 40', permettendo la scoperta di particelle elementari come il positrone, il kaone, e il muone. Alle energie più basse i raggi cosmici sono prodotti da eventi esplosivi nel Sole, ma all'aumentare dell'energia le loro sorgenti cambiano. Si pensa che alcuni raggi cosmici siano generati da onde d'urto di stelle che esplodono chiamate supernovae. Le sorgenti di raggi cosmici di più alta energia sono i nuclei galattici attivi (AGN), buchi neri, esplosioni di raggi gamma o galassie (starburst).

I raggi cosmici a bassa energia sono misurati inviando rivelatori ad altezze superiori alla atmosfera terrestre, utilizzando palloni aerostatici o satelliti ad alta quota. Per quelli ad alta energia, invece, si sfrutta l'atmosfera terrestre.

Quando un raggio cosmico colpisce un atomo di ossigeno o azoto nell'atmosfera, provoca una violenta collisione che genera una serie di nuove particelle, come mesoni, pioni e kaoni. Queste particelle poi decadono, producendo altre particelle come muoni, neutrini e fotoni. I fotoni, a loro volta, creano elettroni e positroni, che irradiano altri fotoni, creando una vera e propria cascata elettromagnetica. Questo processo continua a ripetersi finché l'energia degli elettroni e positroni non diventa troppo bassa per produrre altri fotoni. L'atmosfera funziona da amplificatore, aumentando così il numero di particelle in modo che lo sciame che si forma possa essere registrato con appositi rivelatori. Grazie a questi rivelatori, i ricercatori possono capire la forma e la dimensione dello sciame e risalire alle caratteristiche del raggio cosmico primario, come la sua direzione e l'energia.

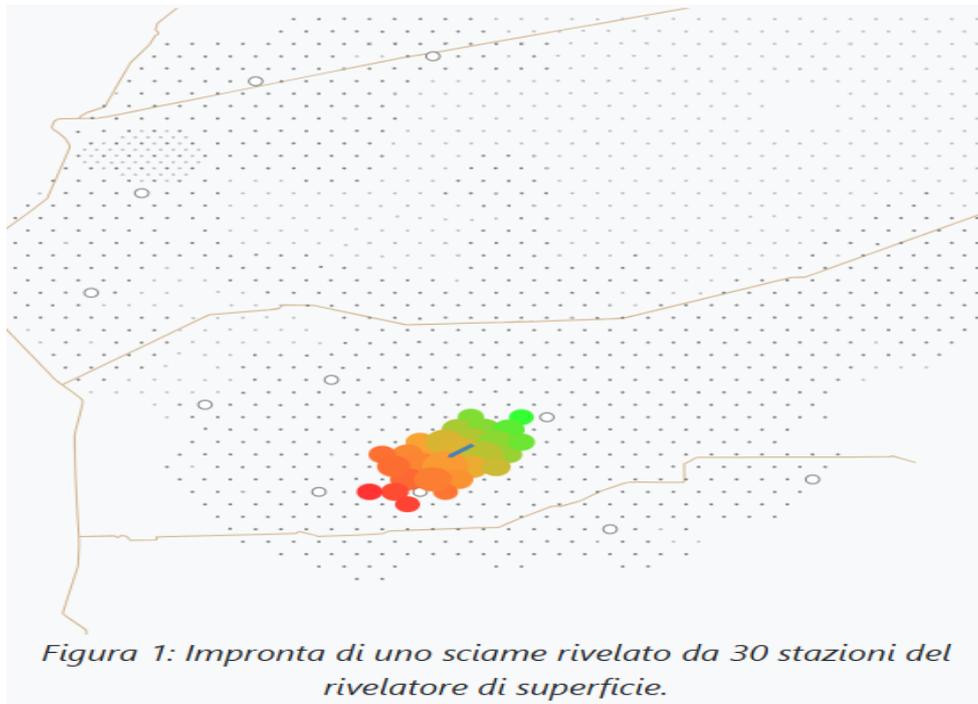
I raggi cosmici vengono studiati grazie ad appositi rivelatori dell'Osservatorio Pierre Auger, il più grande osservatorio di raggi cosmici al mondo, in Argentina, che copre un'area di 3000 km<sup>2</sup>. Per rilevare i vasti sciame atmosferici generati da questi raggi cosmici primari, l'osservatorio utilizza 1660 rivelatori disposti su una griglia triangolare con una distanza di 1,5 km tra loro.

Ci sono due tipi di rivelatori:

Rivelatori di fluorescenza (FD - Fluorescence Detector) e Rivelatori di superficie (SD - Surface Detector).

Il rivelatore di superficie di Auger è costituito da 1660 rivelatori Cherenkov ad acqua (WCD), cioè delle taniche contenenti 12.000 litri di acqua. Quando le particelle cariche dello sciame cosmico, che viaggiano a velocità superiori a quelle della luce nell'acqua, attraversano la tanica producono luce Cherenkov che viene rilevata dai sensori di luce chiamati fotomoltiplicatori (PMT). I dati pubblici della Collaborazione Auger, usati durante la Masterclass Auger svoltasi presso l'Università degli studi di Napoli “Federico II”, il 06/03/25, organizzata dall' INFN (Istituto Nazionale di Fisica Nucleare), includono 25086 eventi misurati con il rivelatore di superficie. Tutte le particelle dello sciame si muovono a velocità quasi pari a quella della luce ovvero 300.000.000 metri al secondo. Le particelle formano una specie di disco molto sottile che si sposta in avanti, al centro di questo disco le particelle sono più concentrate, cioè presenti in numero maggiore, va riducendosi verso i bordi.

Le particelle dello sciame colpiscono i rivelatori Cherenkov ad acqua in momenti diversi a seconda della direzione di arrivo del raggio cosmico. Se il raggio cosmico arriva verticalmente, i rivelatori alla stessa distanza dal centro dello sciame vengono colpiti quasi nello stesso momento e l'impronta rilasciata a terra sarà circolare e simmetrica. Se il raggio cosmico arriva inclinato, impatta sui rivelatori alla stessa distanza dal centro dello sciame con un leggero ritardo tra un lato ed un altro proiettando a terra un ovale con relativa distribuzione del segnale non uniforme. I rivelatori sono molto veloci e riescono a misurare il tempo con una precisione di 25 nanosecondi (cioè un miliardesimo di secondo). Grazie a questa precisione, si può capire la direzione di arrivo del raggio cosmico, con un errore che è solo di circa  $1^\circ$ . Nell'esempio riportato in **Fig.1**, lo sciame arriva da una direzione inclinata di  $54,1^\circ$  rispetto alla verticale.



I punti colorati corrispondono alle 30 stazioni in questo evento che sono state colpite dalle particelle dello sciame, con i colori che rappresentano il tempo del loro arrivo: **verde: colpito prima, rosso colpito dopo.**

In sintesi, un evento SD all'osservatorio Pierre Auger si verifica quando un raggio cosmico interagisce con l'atmosfera terrestre e produce uno sciame che viene rilevato dalle stazioni del rivelatore di superficie, permettendo di ottenere informazioni sulla sua energia, direzione e natura.

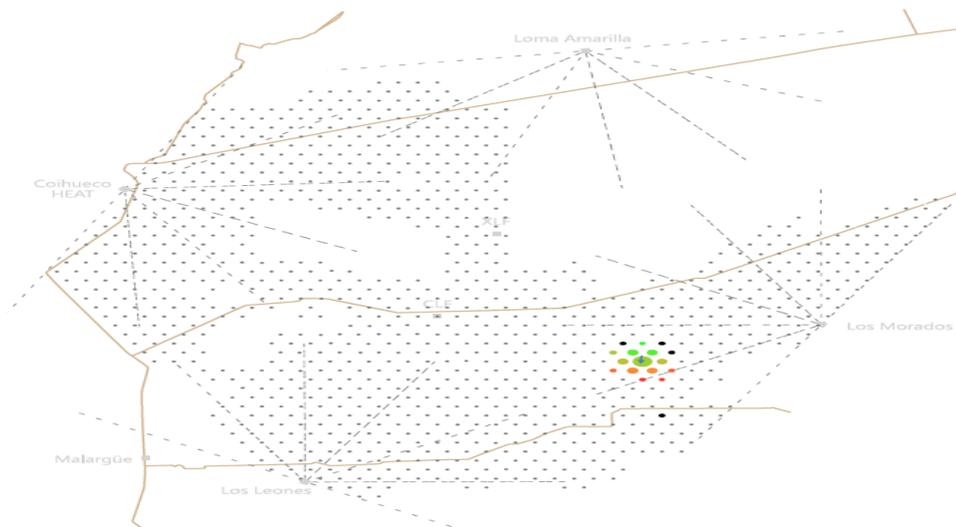
Durante la Masterclass Auger svoltasi il 6 marzo, all'università Federico II di Napoli, abbiamo avuto la possibilità di ricostruire 50 eventi rilevati dall'osservatorio Pierre Auger, selezionare quelli che contenevano l'informazione sulle direzioni d'arrivo e sulla loro origine e infine discutere su quali fossero i luoghi dell'Universo dove vengono prodotti i raggi cosmici. Di seguito sarà descritta l'ANALISI di uno di questi eventi SD svolta.

### **ANALISI EVENTO NUMERO 070137858700[2]**

Grazie ai dati scaricabili dal sito di [opendata.auger.org/display.php](http://opendata.auger.org/display.php) è stato analizzato l'evento 070137858700, evento di energia più elevata rilevato dall'SD nella versione Open Data del 2021, ha un'energia di  $144,1 \times 10^{18} \text{eV}$  e  $14,3^\circ$  di angolo zenitale registrato il 14 gennaio 2007 alle 09:50.

### **VISTA DELL'ARRAY (Fig.2)**

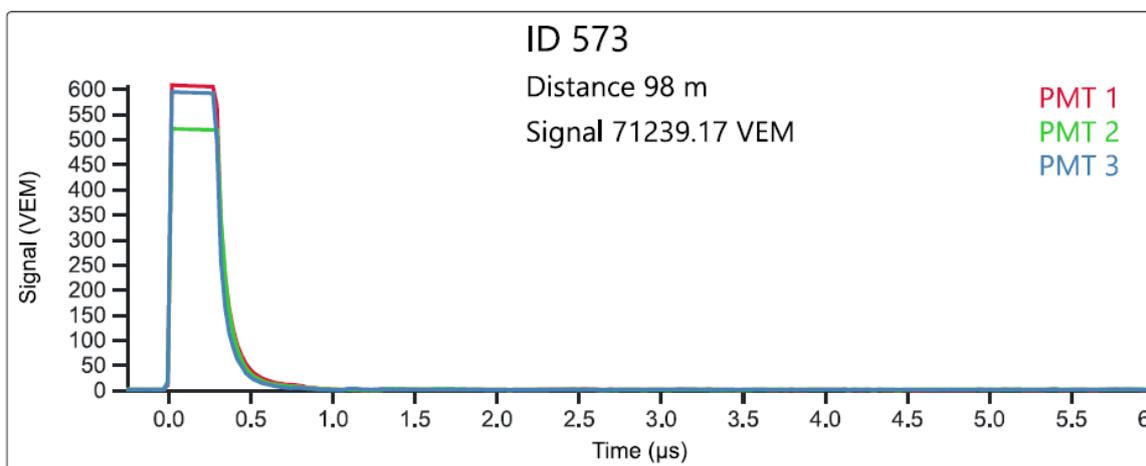
Il colore ci indica la temporizzazione della stazione, i colori caldi, come il rosso, indicano che la stazione ha rilevato le particelle più tardi, i colori freddi, come il verde, indicano che la stazione ha rilevato le particelle più presto. Il punto grande verde rappresenta il "CORE" si riferisce al "centro" dell'evento, il core è l'intersezione tra l'asse dello sciame e suolo, la stazione più vicina al core ha il segnale maggiore. La freccia indica la direzione di arrivo dei raggi cosmici.



**Fig.2** L'impronta a terra dello sciame verticale viene visualizzata sull'intero array. Ogni punto rappresenta una stazione del rivelatore di superficie. Le stazioni appaiono a colori se sono state attivate dall'evento.

### TRACCE SD

Quando i muoni dello sciame colpiscono l'acqua attraversandola ad una velocità maggiore di quella della luce, questa parte sensibile del rivelatore produce la luce Cherenkov successivamente raccolta e trasformata in segnale elettrico da uno dei 3 fotomoltiplicatori (PhotoMultiplier Tube PMT) contenuti nella stessa tanica d'acqua. La catena elettronica successiva processa il segnale in uscita del PMT ottenendo il grafico di **Fig.3** in cui si esprime in VEM (**V**ertical **E**quivalent **M**uon) il segnale rilasciato dallo sciame nell'attraversare la stazione in funzione del tempo in cui sono stati attivati i 3 PMT.

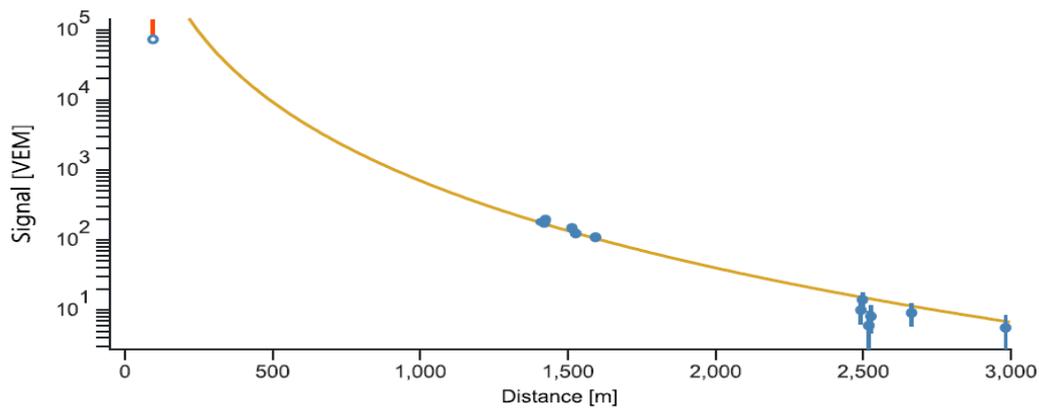


**Fig.3** Il grafico in figura 3 rappresenta la risposta dei 3 PMT attivati nella stazione 573 in funzione del tempo. Sull'asse delle ordinate è riportato in VEM, cioè l'intensità del segnale dovuto al muone che attraversa verticalmente la tank. Sull'asse delle ascisse il tempo per tracciare come il segnale cambia nel tempo.

I PMT delle stazioni vicino al core rilevano un segnale più intenso. Man mano che ci si allontana dal core, l'intensità del segnale diminuisce progressivamente, sia per motivi geometrici sia per l'assorbimento atmosferico.

### RICOSTRUZIONE SD

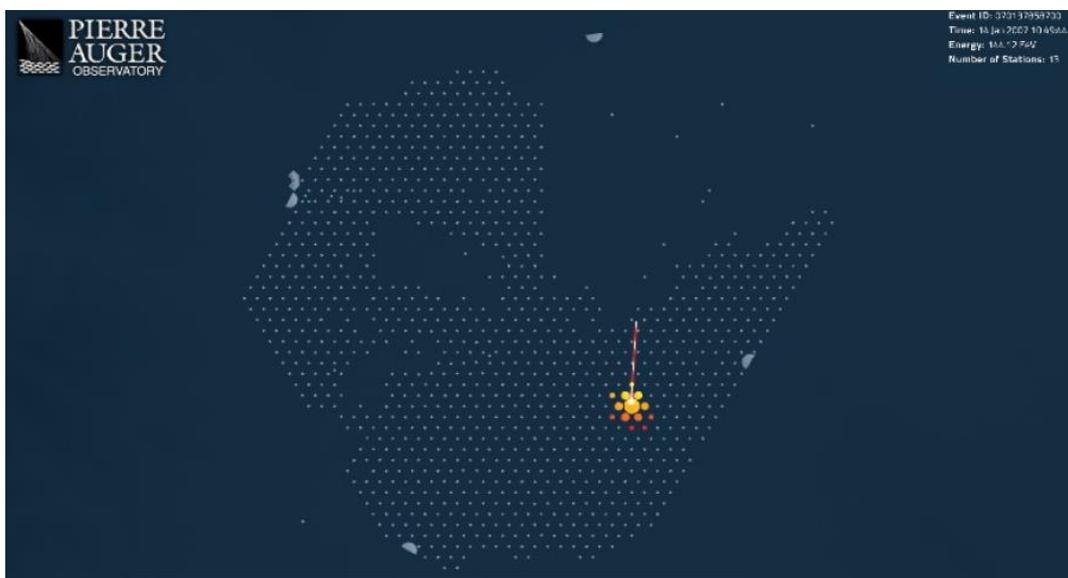
Si può notare che all'aumentare della distanza della stazione dal core dell'evento diminuisce il segnale rilevato dalle nostre stazioni, questo perché il segnale diminuisce con l'aumentare della distanza dal centro dell'**air shower** (cascata di particelle) perché più mi allontano dall'asse dello sciame, meno particelle, che viaggiano a velocità maggiore di quella della luce, entrano nel sensore, quindi meno luce Cherenkov viene emessa. Infatti in **Fig.4** si può notare che all'aumentare della distanza della stazione dal core dell'evento diminuisce il segnale rilevato dalle nostre stazioni.



**Fig.4.** Mentre nel grafico 3 avevamo rappresentato il segnale in una stazione, in questo grafico ogni punto corrisponde ad una stazione. Si può notare che all'aumentare della distanza della stazione dal core dell'evento diminuisce il segnale rilevato dalle nostre stazioni.

### VISTA 3D DEL RAGGIO COSMICO CHE HA GENERATO IL NOSTRO EVENTO

L'immagine (**Fig.5**) mostra una vista 3D dell'evento registrato il 14 gennaio 2007 alle ore 09:50 dall'Osservatorio Pierre Auger, generato da un raggio cosmico di altissima energia, pari a  $144,1 \times 10^{18}$  eV. La linea rossa rappresenta la traiettoria dello sciame atmosferico esteso prodotto dall'interazione della particella primaria con l'atmosfera. I cerchi gialli e rossi indicano le 13 stazioni del rivelatore che hanno registrato il passaggio dello sciame. Le stazioni più vicine al core, evidenziate con colori più accesi, hanno rilevato segnali più intensi, mentre quelle più lontane mostrano un'intensità minore, coerente con la geometria dello sciame e la perdita di energia delle particelle. Questa visualizzazione è fondamentale per ricostruire la direzione di arrivo del raggio cosmico e per stimarne con precisione l'energia.



### CONCLUSIONI FINALI

Attraverso questa esperienza di Masterclass e l'analisi dei dati svolta, abbiamo potuto comprendere in modo diretto e pratico come si sviluppa uno sciame atmosferico, abbiamo capito l'enorme lavoro svolto dall'osservatorio Pierre Auger e compreso quanto tutto ciò sia cruciale sull'origine e sulla natura dei raggi cosmici. Ci siamo divertiti molto a ricostruire diversi eventi SD all'interno dell'università Federico II e grazie a questo lavoro, abbiamo imparato molto di più non solo sulla struttura dello sciame, ma anche sulle metodologie di analisi utilizzate nella fisica delle alte energie.

#### Bibliografia

- [1] [opendata.auger.org/outreach.php?lan=it](http://opendata.auger.org/outreach.php?lan=it) e wikipedia;
- [2] [opendata.auger.org/display.php](http://opendata.auger.org/display.php)