

---

# Caratteristiche principali degli esperimenti per la misura dei raggi cosmici da terra

**Andrea Chiavassa**

Dipartimento di Fisica - Università degli Studi di Torino

---

## Introduzione

Quando una particella della radiazione cosmica impatta con l'atmosfera terrestre, interagisce con un nucleo della stessa, viene distrutta e non raggiunge la superficie terrestre. Questo ne impedisce la misura diretta con strumentazione posta a terra. La misura diretta dei raggi cosmici è solo possibile per mezzo di esperimenti operanti al di fuori dell'atmosfera e operanti quindi su satelliti. Questo limita il range energetico che può essere studiato con questa tecnologia; infatti, dovendo essere posti in orbita, le dimensioni di questi apparati sono vincolate sia in estensione che in massa, ponendo due grandi limitazioni. La prima è dovuta alla statistica. Il numero di raggi cosmici diminuisce rapidamente con l'energia (circa  $E^{-2.7}$ , vedi figura 1), quindi, con apparati che hanno una superficie dell'ordine della decina di metri quadrati, non si riesce ad accumulare un numero di eventi sufficiente nel tempo di operazione di un esperimento (tipicamente dieci/quindici anni). La seconda limitazione è dovuta alla misura dell'energia delle particelle primarie che è solitamente effettuata con calori-

metri al cui interno viene assorbita e rivelata tutta l'energia della particella. Al crescere dell'energia è necessaria una massa sempre maggiore per poter contenere tutta l'energia della particella. Il limite sulla massa degli strumenti che si possono portare in orbita implica che la precisione con cui si misura l'energia del primario diminuisce al suo crescere (diminuendo la frazione di energia del primario contenuta nello strumento).

Tutto questo comporta che oltre una certa energia (pari a circa  $10^{14}$  eV) la misura dei raggi cosmici primari può solo essere effettuata con esperimenti che operano a terra dove si può ovviare ai problemi di statistica realizzando esperimenti di grandi superfici (da  $10^4\text{m}^2$  a  $10^3\text{km}^2$ ), perdendo al contempo la possibilità di misurare direttamente le particelle primarie.

In seguito all'interazione dei raggi cosmici con i nuclei dell'atmosfera si genera una cascata di particelle (solitamente indicata con l'acronimo EAS, *Extensive Air Shower*). Il numero di particelle comprese nello sciame cresce all'aumentare dell'energia della particella primaria. Man mano che lo sciame procede nel suo sviluppo diminuisce l'energia delle particelle che lo compongono.

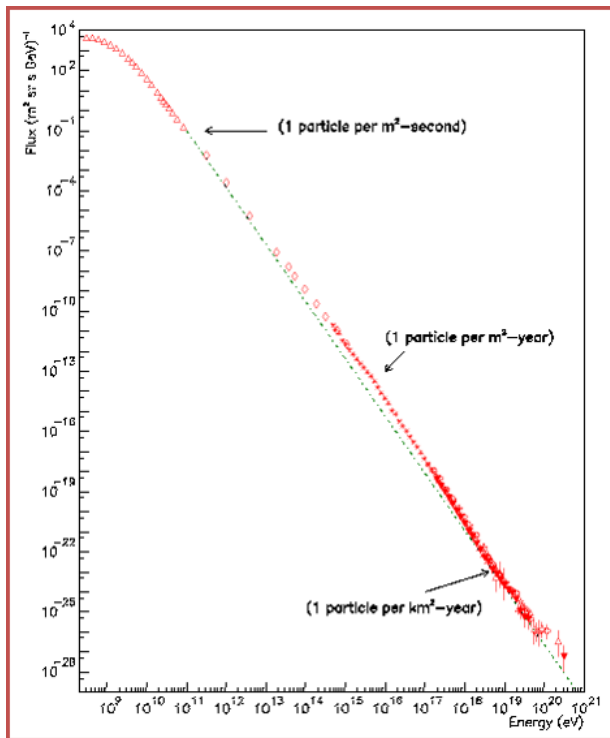


Figura 1: Spettro differenziale dei raggi cosmici

Questo processo prosegue fino a che l'energia delle particelle nella cascata è tale da permettere la loro moltiplicazione, quando questa non è più sufficiente alla loro moltiplicazione le stesse depositano la loro energia in atmosfera, venendo assorbite. Il numero di particelle comprese nella cascata a questo punto diminuisce e la stessa viene rapidamente estinta. È molto importante evidenziare che le cascate che si sviluppano in atmosfera comprendono diversi tipi di particelle: le più abbondanti sono fotoni ed elettroni, seguite da muoni e da una piccola componente di adroni (principalmente pioni).

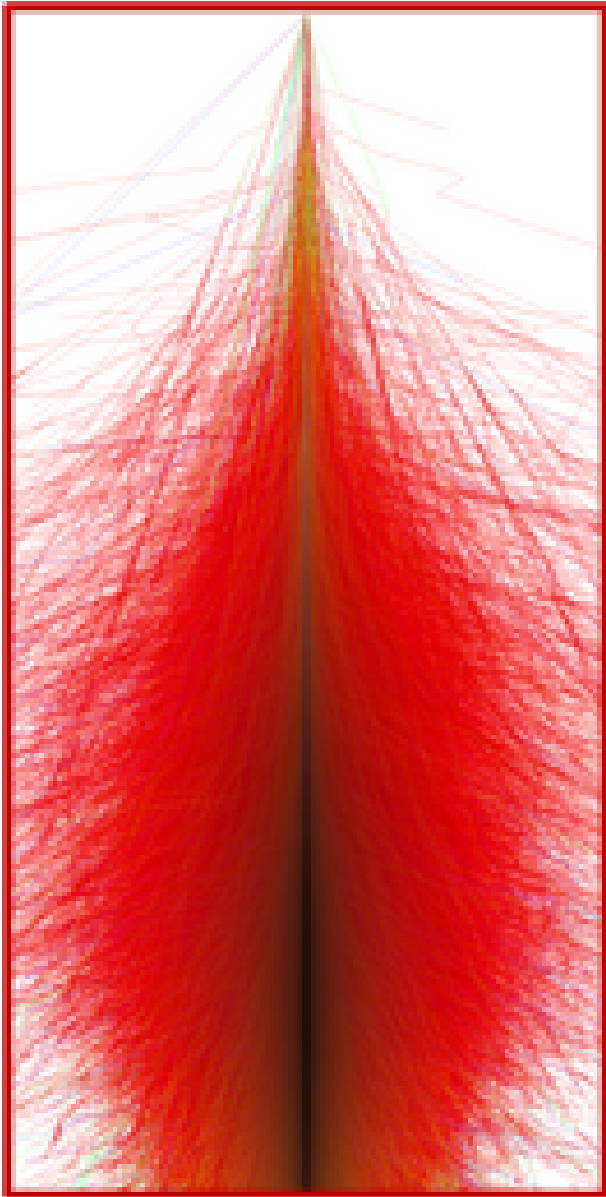
Senza entrare nei dettagli dello sviluppo degli EAS possiamo dire che: l'energia del primario ( $E_0$ ) è proporzionale al numero di particelle ( $N_e$  numero di elettroni  $N_e \propto E_0$ ,  $N_\mu$  numero di muoni  $N_\mu \propto E_0^\beta A^{1-\beta}$ , dove  $A$  è il numero di massa del primario, e  $\beta < 1$ ) alla quota di osservazione. La direzione di arrivo è ricavabile dal tempo di arrivo delle particelle dello sciame e la natura della particella primaria (tra cui  $A$ ) si può inferire da diversi parametri quali il rapporto tra le diverse particelle comprese nello sciame, la sua morfologia e la quota in atmosfera ( $X_{max} \propto (\ln E_0 - \ln A)$ ) in cui lo sciame raggiunge la massima estensione (cioè il massimo numero di particelle). Quindi, con esperimenti

che misurano uno sciame alla sola quota di osservazione, la conoscenza del numero di elettroni, quello di muoni e del tempo di transito è sufficiente per risalire alle caratteristiche del primario. Se invece siamo in grado di misurare tutto lo sviluppo longitudinale dello sciame possiamo ottenere una misura quasi calorimetrica dell'energia della particella primaria in quanto utilizziamo l'atmosfera come un calorimetro al cui interno viene depositata tutta l'energia della particella primaria. Questa misura è solo possibile ad altissime energie, dell'ordine di  $\sim 10^{17}$  eV, con la tecnica della misura della luce di fluorescenza (sulla quale torneremo più avanti). È anche importante sottolineare come durante lo sviluppo di un EAS le particelle che lo compongono si distribuiscono attorno all'asse dello sciame per centinaia di metri e su distanze sempre maggiori al crescere dell'energia del primario. Nella figura 2 è mostrato un esempio di simulazione dello sviluppo longitudinale di uno sciame atmosferico esteso generato da un protone di energia  $10^{15}$  eV; mentre nella figura 3 è riportata la simulazione dello sviluppo laterale dello stesso sciame.

Avendo delineato quali sono le caratteristiche principali e comuni a tutti gli esperimenti che operano rivelando degli EAS dobbiamo differenziarli a seconda del *range* energetico cui siamo interessati e al tipo di particelle della radiazione cosmica che vogliamo studiare.

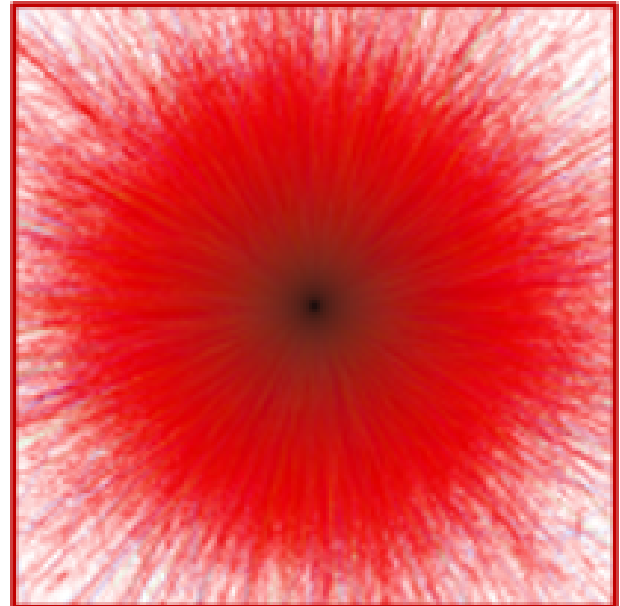
La differenziazione dovuta al tipo di particella primaria cui siamo interessati ci porta a dividere gli esperimenti in due famiglie: quelli interessati alla misura di EAS generati da fotoni primari e quelli che studiano la radiazione cosmica elettricamente carica. Nel primo caso, il punto essenziale è selezionare tra tutti gli eventi misurati quelli, meno dell'1%, che sono originati da fotoni primari. Il principale interesse di questi esperimenti è dovuto al fatto che, essendo i fotoni elettricamente neutri, non sono deviati dai campi magnetici galattico ed extra-galattico, questo permette di risalire agli oggetti celesti che li hanno originati, e di fare dell'astrofisica delle altissime energie.

Nel caso di esperimenti dedicati allo studio della radiazione cosmica carica non è possibile (come vedremo) determinare il tipo di particella che ha originato l'EAS. Le particelle primarie, essendo deviate dai campi magnetici, quando im-



**Figura 2:** Simulazione dello sviluppo longitudinale di un EAS generato da un protone di energia  $10^{15}$  eV. Nel grafico sono rappresentate le tracce delle singole particelle originate nello sviluppo dello sciame. Le ordinate rappresentano l'altezza sul livello del mare (o la profondità atmosferica attraversata). Si può osservare come il numero di particelle aumenti man mano che lo sciame si evolve in atmosfera, raggiunge un valore massimo e poi diminuisce.

pattano con l'atmosfera terrestre non provengono dalla direzione della loro sorgente. Gli studi di queste particelle sono comunque molto importanti perchè la quantità di energia distribuita nella nostra galassia sotto forma di particelle relativistiche ed elettricamente cariche è confrontabile con le altre principali forme di energia diffusa, ad esempio quella del campo magnetico galat-



**Figura 3:** Simulazione dello sviluppo laterale di un EAS generato da un protone di energia  $10^{15}$  eV. È rappresentato l'allargamento delle particelle dello sciame, nel piano orizzontale, attorno al suo asse (retta centrale che rappresenta la proiezione della direzione di arrivo del raggio cosmico che ha originato lo sciame). Le dimensioni di questa figura sono dell'ordine delle centinaia di metri.

tico, e non può quindi essere ignorata. Inoltre, questi eventi permettono uno studio dei fenomeni più energetici che avvengono nell'universo e, non ultimo, in essi si raggiungono energie che non sarà mai possibile produrre agli acceleratori di particelle costruiti dall'uomo.

Questo articolo è quindi organizzato con una sezione in cui descriverò le caratteristiche generali di questi esperimenti: tecniche di misura utilizzate, dimensioni degli esperimenti, quota sul livello del mare cui realizzare gli apparati di misura, problematiche relative alla loro calibrazione. Nella terza sezione descriverò brevemente alcuni dei più importanti (a mio giudizio) esperimenti recentemente realizzati; concluderò questa breve discussione facendo il punto sullo stato attuale di questo tipo di studi e cercando di evidenziare possibili sviluppi futuri.

## Generalità degli esperimenti per la misura degli EAS

Seppur schematicamente abbiamo visto come un EAS sia composto da vari tipi di particelle.

Queste sono, in ordine di numerosità e senza differenziare tra particelle e le corrispondenti antiparticelle: fotoni, elettroni, muoni e adroni in generale (principalmente pioni). Quindi, con gli apparati per la misura degli EAS, dobbiamo misurare direttamente queste particelle oppure rivelare un segnale da loro generato.

Riassumo brevemente alcuni degli strumenti che è possibile utilizzare per la misura delle particelle degli EAS.

## Scintillatori

Uno degli strumenti più utilizzati per la misura delle particelle degli EAS sono gli scintillatori, in cui le particelle cariche comprese nello sciame depositano parte della loro energia eccitando gli atomi che emettono dei fotoni. Con dei fotomoltiplicatori (o altri sensori di luce come i SiPM, *silicon photomultipliers*) vengono raccolti i fotoni emessi, generando un segnale di ampiezza proporzionale all'energia depositata nello scintillatore. Questi strumenti sono molto utilizzati per contare il numero di particelle che attraversano il rivelatore e misurare il tempo di transito delle stesse (con una precisione dell'ordine dei ns). Questi strumenti possono anche essere posti sotto un opportuno strato di materiale che assorbe gli elettroni permettendo il transito della sola componente muonica dello sciame, che può quindi essere misurata.

## Rivelatori Čerenkov ad acqua

Un altro modo per misurare il numero di particelle nello sciame e misurarne il tempo di transito è quello dei rivelatori a Čerenkov ad acqua. Le particelle cariche dello sciame attraversando l'acqua del rivelatore emettono luce Čerenkov che viene poi rivelata da fotomoltiplicatori o SiPM. Anche in questo caso la quantità di luce rivelata è proporzionale al numero di particelle che attraversano il rivelatore e si ottiene una misura del tempo di transito delle particelle. Si utilizzano questi rivelatori invece degli scintillatori per due motivi, la prima è principalmente economica essendo il costo minore di quello degli scintillatori. Il secondo è legato al fatto che, realizzando rivelatori con almeno un metro di acqua (in altezza) si ha una grande probabilità che i fotoni dello sciame interagiscano producendo una

coppia elettrone-positrone che a sua volta genera della luce Čerenkov che può essere misurata. Questi rivelatori sono quindi più sensibili degli scintillatori ai fotoni.

## Rivelatori di posizione

In alcune applicazioni, e soprattutto per la realizzazione di rivelatori di dimensioni relativamente contenute posti nella parte centrale dell'esperimento, si possono utilizzare camere a filo che permettono di tracciare la singola particella oltre a misurare l'energia che questa deposita in questi strumenti.

## Rivelatori di luce Čerenkov

Le particelle cariche degli EAS, muovendosi in atmosfera con velocità maggiore di quella della luce nel mezzo, emettono luce Čerenkov; questa può essere raccolta o utilizzando degli specchi con dei fotomoltiplicatori posti nel loro fuoco o con fotomoltiplicatori direttamente esposti all'aria aperta. La luce Čerenkov emessa durante lo sviluppo degli EAS è molto poca (circa  $10^{-4}$  volte della luce notturna) ma essendo concentrata in una decina di nanosecondi è possibile rivelarla. Da questo si comprende come questi strumenti possano lavorare solo di notte ed in assenza di luna piena (duty cycle circa del 10-15%). In compenso permettono una misura quasi calorimetrica dell'energia del primario in quanto tutti i fotoni Čerenkov emessi durante lo sviluppo dell'EAS non vengono successivamente assorbiti e possono essere misurati.

## Rivelatori di luce di fluorescenza

Un altro tipo di strumentazione con cui si misura della luce emessa durante lo sviluppo degli EAS sono i cosiddetti rivelatori di luce di fluorescenza. Il segnale che si misura con questi strumenti è la luce emessa in atmosfera a causa dell'eccitazione e del successivo ritorno allo stato fondamentale degli atomi dell'atmosfera: in sostanza si utilizza l'atmosfera come un enorme scintillatore. Questi strumenti permettono di misurare la luce emessa nei vari stadi di sviluppo in atmosfera degli EAS e permettono quindi una misura del loro sviluppo longitudinale. Si ottiene quindi una misura calorimetrica dell'energia del primario



e si misura il punto di massimo sviluppo dello sciame. Anche questi rivelatori (come quelli di luce Čherenkov) operano solo di notte ed in assenza di luna, quindi hanno un basso duty cycle, inoltre, essendo l'aria un pessimo scintillatore, la luce emessa è poca e quindi questi strumenti funzionano solo ad energie superiori a  $10^{17}$  eV. In compenso, come accennato in precedenza, forniscono una misura calorimetrica dell'energia del primario e una misura diretta del punto di massimo sviluppo dell'EAS (misure al momento possibili solo con questa tecnica). Dobbiamo infine notare che mentre la luce Čherenkov degli EAS è emessa in un cono di angolo molto piccolo rispetto alla direzione di propagazione dello sciame, la luce di fluorescenza è emessa isotropicamente. Quindi, con un rivelatore che osserva frontalmente lo sciame il segnale è dominato dalla luce Čherenkov, mentre con uno posto lateralmente domina quella di fluorescenza.

Da questa veloce carrellata delle tecniche di misure utilizzabili per rivelare gli EAS vediamo che possiamo misurare per ogni evento il numero totale di particelle nello sciame alla quota di osservazione, che abbiamo la possibilità di separare il conteggio della componente penetrante (muoni) dello sciame, e che possiamo determinare il tempo di transito delle particelle.

### Dimensioni degli apparati per la misura di EAS e geometria dei rivelatori

Come mostrato in figura 1 il flusso di raggi cosmici varia rapidamente con l'energia, passando da una particella al secondo per metro quadrato a  $10^{15}$  eV fino a una particella al secolo per chilometro quadrato alle energie estreme ( $> 10^{19}$  eV). Questo ci dice subito come, per poter ottenere un numero di eventi statisticamente significativo, le dimensioni degli apparati debbano essere molto diverse a seconda dell'intervallo energetico che vogliamo studiare: per la ricerca di sorgenti di fotoni ( $E < 1$  PeV) e per misure relative ai raggi cosmici galattici ( $E < 10^{17}$  eV) sono sufficienti apparati di superficie compresa tra  $10^4$  e  $10^6$  m<sup>2</sup>; mentre per studiare i raggi cosmici di energia estrema (di origine extra-galattica,  $E > 10^{18}$  eV) la superficie necessaria è di migliaia di km<sup>2</sup>.

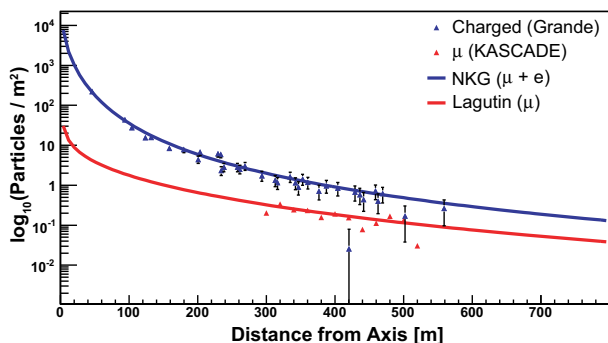
Dato che l'osservabile sperimentale che si può correlare all'energia del primario è il numero di

particelle alla quota di osservazione, idealmente si potrebbe coprire tutta la superficie dell'esperimento di strumentazione sensibile al passaggio delle particelle e semplicemente contare quante particelle sono contenute in ciascuno sciame. Chiamiamo *fill factor* il rapporto tra la superficie attiva e quella totale dell'esperimento. D'altra parte, è immediatamente evidente come non sia possibile coprire superfici molto grandi di rivelatori, questo ci dice come il *fill factor* tipico degli esperimenti vari a seconda dell'intervallo di energia delle particelle primarie che si vogliono studiare con i diversi esperimenti. Di conseguenza varierà anche molto la disposizione geometrica dei rivelatori. Possiamo quindi schematizzare questi due aspetti dandone una descrizione a seconda dell'intervallo energetico e del tipo di primari che vogliamo investigare con un esperimento.

Per lo studio delle energie appena superiori a quelle investigabili con misure dirette, quindi tra le centinaia di GeV e circa dieci TeV, è necessario rivelare EAS formati da poche decine di particelle. In particolare, con gli esperimenti dedicati alla ricerca di sorgenti di fotoni di queste energie la misura della distribuzione spaziale di particelle dello sciame è il parametro che meglio permette di selezionare eventi generati da fotoni tra quelli generati da adroni. Si devono quindi realizzare apparati con *fill factor* molto alto ( $>70\%$ ) per poter misurare la maggior parte delle particelle dello sciame e per ricostruirne l'immagine a terra con buona precisione. Esempi di apparati di questo genere sono MILAGRO [1], LHAASO-WCDA [2] in cui sono state realizzate delle piscine d'acqua (*fill factor* circa del 100%); HAWC [3] composto da *tank* cilindriche di acqua affiancate tra di loro; ARGO-YBJ [4] costituito da un tappeto di rivelatori RPC (*Resistive Plate Chambers*), di forma rettangolare, disposti l'uno a fianco dell'altro. La dimensione tipica di questi apparati è dell'ordine dei  $10^4$  m<sup>2</sup>, la dimensione della cella elementare (che definisce la granularità con cui posso ricostruire il profilo laterale dello sciame) va dalle centinaia di cm<sup>2</sup> (ARGO-YBJ) alla decina di m<sup>2</sup> degli altri esperimenti.

Salendo con l'energia, avendo quindi come scopo la ricerca di sorgenti di fotoni di energia maggiore di cento TeV, o lo studio dei raggi cosmici carichi di origine galattica ( $10^{14} < E < 10^{17}$

eV, la superficie degli esperimenti arriva fino ai  $10^6 \text{ m}^2$  e il *fill factor* che si può raggiungere è molto più basso, tipicamente inferiore al 5%. Infine, arrivando alle energie estreme dello spettro gli apparati coprono migliaia di chilometri quadrati e il *fill factor* deve scendere ulteriormente arrivando a valori pari a circa  $10^{-4} - 10^{-5}$ . In questi esperimenti i rivelatori vengono disposti su una superficie, possibilmente piana, con geometria regolare (sempre compatibilmente con la logistica del sito sperimentale). Solitamente i rivelatori vengono disposti ai vertici o di quadrati (KASCADE [5] o di triangoli equilateri (KASCADE-Grande [6], TUNKA [7], LHAASO-KM2A [2]), la distanza tra i vari elementi dell'apparato varia a seconda delle dimensioni dello stesso e del *fill factor* che si vuole (può) raggiungere. Con questi apparati si campiona il numero di particelle in diversi punti del piano, da queste misure si ricostruisce il profilo laterale dello sciame il cui fattore di normalizzazione è un'osservabile sperimentale da cui si può stimare l'energia del primario (vedi in seguito la discussione sulla calibrazione di questi apparati), la distribuzione laterale di un evento è mostrata come esempio in figura 4. Salendo ulteriormente in energia e



**Figura 4:** Distribuzione laterale misurata per un evento di raggi cosmici (esperimento KASCADE-Grande [6]).

arrivando quindi allo studio delle energie estreme dello spettro primario ( $E > 10^{18}$  eV) dove la radiazione cosmica è prevalentemente di origine extra-galattica, i flussi diventano così bassi che per poter accumulare una statistica sufficiente gli apparati devono avere estensioni enormi. I due maggiori esperimenti che operano a queste energie sono il Pierre Auger Observatory [8] e Telescope Array [9], che si estendono su superfici di  $3000 \text{ km}^2$  e di  $700 \text{ km}^2$  rispettivamente. In que-

sto caso il *fill factor* è dell'ordine di  $10^{-4} - 10^{-5}$ , la disposizione dei rivelatori è su una griglia triangolare di lato 1500 m nel caso di Auger (la superficie del singolo elemento è  $10 \text{ m}^2$ ) e su una griglia quadrata di lato 1200 m per Telescope Array (area del singolo elemento  $3 \text{ m}^2$ ). A queste energie è anche possibile la rivelazione della luce di fluorescenza degli EAS ed in entrambe gli esperimenti sono stati posti ai margini della superficie coperta dagli apparati dei telescopi di luce di fluorescenza.

## Quota sul livello del mare

Uno dei parametri fondamentali da stabilire nell'identificare il luogo in cui costruire un apparato è la quota sul livello del mare. Osservando lo sviluppo longitudinale di uno sciame (vedi figura 2) possiamo notare come il numero di particelle aumenta fino a raggiungere un punto di massimo sviluppo, dopodiché le particelle vengono assorbite e il numero di particelle nello sciame si riduce. Già da questo è chiaro che, per avere il massimo numero di particelle disponibili per la rivelazione, la localizzazione ideale di un apparato è alla quota cui lo sciame raggiunge il massimo sviluppo. Questo è tanto più importante quanto è più bassa l'energia dei primari che si vuole studiare. In questo senso, gli apparati per studiare i primari di centinaia di GeV devono essere costruiti sopra i 4000 m sul livello del mare s.l.m. (4100 m HAWC, 4300 m ARGO-YBJ, 4410 m LHAASO).

Nel punto di massimo sviluppo di uno sciame il numero di elettroni non dipende dalla natura del primario (il che rappresenta un vantaggio per la calibrazione energetica, vedi sezione seguente); a questa profondità atmosferica solo la componente muonica degli sciami è sensibile alla natura del primario. Quando invece l'esperimento osserva gli EAS nella fase di assorbimento, dopo aver raggiunto il massimo sviluppo, sia il numero di elettroni che quello di muoni alla quota di osservazione dipendono dalla natura del primario (oltre che dalla sua energia). Esperimenti posti a queste quote hanno maggiori incertezze nella calibrazione energetica ma hanno una maggiore sensibilità alla natura del primario. Gli apparati per lo studio della radiazione cosmica di origine galattica sono stati realizzati a

quote molto diverse tra di loro dai 100 m s.l.m. di KASCADE, ai 600 m s.l.m. di TUNKA, ai 2850 m s.l.m. di ICE-TOP.

Esperimenti che misurano lo sviluppo longitudinale dello sciame (ad esempio i rivelatori di luce di fluorescenza), per poter eseguire una misura quasi calorimetrica dell'energia, devono poter osservare tutto lo sviluppo dello sciame e quindi devono essere realizzati ben al di sotto della quota di massimo sviluppo dello sciame. È importante osservare come tutto questo è riferito a sciami che arrivano in direzione verticale (angolo zenitale  $\theta = 0^\circ$ ), quando un evento è rivelato ad un angolo zenitale  $\theta$ , rispetto alla verticale, lo spessore atmosferico attraversato è aumentato di un fattore  $1/\cos\theta$ , di conseguenza è possibile osservare lo sviluppo completo di uno sciame anche essendo a quote atmosferiche relativamente elevate (per esempio l'esperimento Auger è realizzato a circa 1500 m s.l.m.).

Gli esperimenti che rivelano luce Čerenkov o di fluorescenza emessa in atmosfera è indispensabile che siano costruiti in luoghi remoti lontani da sorgenti artificiali di luce.

Solitamente, a parte rare eccezioni, gli esperimenti dedicati alla misura di EAS non sono realizzati all'interno di centri di ricerca attrezzati, rendendo gli aspetti logistici (dalle vie di accesso, alla vicinanza di strutture ricettive, alla disponibilità di manodopera locale, alla disponibilità di potenza elettrica sufficiente per operare la strumentazione e di una rete internet per la trasmissione di dati) un aspetto molto rilevante nella scelta del luogo in cui costruire gli apparati.

## Calibrazione degli apparati per la misura di EAS

Non esistendo delle sorgenti calibrate di raggi cosmici il problema della calibrazione degli apparati per la misura di EAS è molto rilevante e rappresenta la maggior sorgente di errori sistematici nella determinazione delle caratteristiche delle particelle primarie.

In realtà per quanto riguarda la calibrazione assoluta della misura della direzione di arrivo dei raggi cosmici è vero che non esiste una sorgente puntiforme, ma essendo la luna un corpo celeste di dimensioni non trascurabili, vicino alla terra, ci aspettiamo una diminuzione del flusso

di raggi cosmici da questa direzione. Essendo le dimensioni della luna dell'ordine di  $0.5^\circ$  se la risoluzione angolare di un apparato sciami è di questo ordine di grandezza un esperimento deve misurare un deficit di raggi cosmici provenienti dalla direzione della luna. Questa tecnica è ampiamente sfruttata da tutti gli esperimenti dedicati alla misura dei raggi cosmici carichi. Gli esperimenti dedicati alla ricerca di sorgenti di fotoni devono invece dimostrare di osservare la sorgente di fotoni di alta energia più intensa conosciuta, la CRAB Nebula (se questa si trova nel loro campo di vista). Questo permette anche di valutare la capacità di reiezione del fondo adronico da parte dell'esperimento.

Per quanto riguarda la calibrazione energetica questi esperimenti non possono in alcun modo utilizzare una sorgente calibrata e devono quindi ricorrere a una procedura indiretta che sfrutta una simulazione completa dello sviluppo di un EAS. In questo momento il codice più utilizzato e di riferimento nella comunità si chiama CORSIKA, è stato sviluppato presso il Karlsruhe Institute for Technology ed è un software ad accesso libero. Una simulazione degli EAS deve partire dalla prima interazione tra la particella primaria e un nucleo dell'atmosfera e procedere poi attraverso tutte le successive interazioni di energia inferiore ed i decadimenti delle particelle. Le interazioni tra particelle adroniche sono studiate agli acceleratori di particelle, le energie più alte sono state raggiunte al collisore protone-protone LHC in funzione al CERN di Ginevra. Con questo acceleratore si è raggiunta un'energia nel centro di massa che corrisponde a quella dell'interazione di un raggio cosmico di energia dell'ordine dei  $10^{16}$  eV. Le simulazioni di EAS generati da particelle di energia superiore ricorrono a modelli di interazione adronica che non possono essere testati agli acceleratori di particelle, è chiaro che questo introduce una incertezza nei risultati di queste simulazioni. Con queste simulazioni si possono riprodurre EAS di energia e primario di natura note e ricavare il numero di elettroni e di muoni alla quota di osservazione, nonché la quota cui lo sciame ha raggiunto il massimo sviluppo.

Bisogna poi considerare altri fattori che fanno variare il numero di particelle in uno sciame alla quota di osservazione, *in primis* la natura

del primario. Come accennato in precedenza, a parità di energia, sciame generati da particelle pesanti raggiungono il massimo sviluppo più in alto in atmosfera e quindi quando sono osservati durante la fase del loro assorbimento sono più lontani dal punto di massimo sviluppo. Questo fa sì che sotto il punto di massimo sviluppo il numero di elettroni in un EAS dipenda, oltre che dall'energia del primario, dalla sua natura: più è alta la massa del primario ( $A$ ) minore è il numero di elettroni generati. Inoltre, il numero di elettroni in uno sciame dipende (a parità di altezza sul livello del mare) dall'angolo zenitale  $\theta$  cui si osserva lo sciame. Uno sciame osservato a  $\theta$  maggiore ha attraversato una quantità di atmosfera maggiore e quindi si trova più lontano dal punto di massimo sviluppo, in una fase di assorbimento più avanzata: a parità di energia il numero di elettroni è minore all'aumentare di  $\theta$ .

Riassumendo, possiamo dire che il numero di elettroni osservato da un esperimento è una funzione dell'energia del primario  $E_0$ , della natura del primario (il suo numero atomico  $Z$ ) e dell'angolo zenitale cui viene osservato lo sciame  $\theta$ . Per avere una calibrazione di  $N_e$  in funzione di  $E_0$  è necessario rimuovere le dipendenze da  $Z$  e da  $\theta$ . La dipendenza dall'angolo zenitale viene trattata utilizzando una procedura di analisi dati (nota come *constant intensity cut*) basata sui dati sperimentali e che ha come unica ipotesi la non dipendenza dall'angolo azimutale del flusso dei raggi cosmici, ipotesi verificata a meno di un fattore  $10^{-3} - 10^{-4}$ . La dipendenza dalla massa del primario non può essere eliminata con i dati sperimentali (non possiamo determinare per ogni evento la  $Z$  del primario) e dobbiamo quindi ricorrere ad un'ipotesi basata su modelli, questa è una seconda fonte di errore sistematico nella calibrazione energetica di questi apparati.

Queste considerazioni sugli errori sistematici valgono per gli esperimenti che campionano uno sciame a un determinato punto del suo sviluppo, il discorso è molto diverso per gli apparati che misurano la luce di fluorescenza.

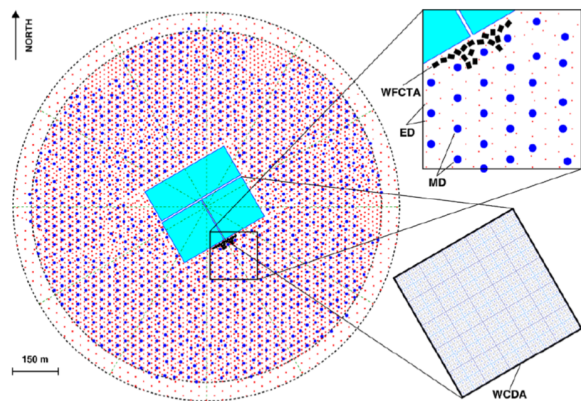
## Breve descrizione di alcuni esperimenti

### LHAASO

Per esemplificare le caratteristiche principali di questi apparati scelgo di descrivere in un certo dettaglio un esperimento appena completato in Cina, LHAASO, che racchiude al suo interno le caratteristiche principali sia di un rivelatore dedicato alla ricerca di sorgenti di fotoni di alta energia che allo studio della radiazione carica di origine galattica (cioè di energia inferiore a  $10^{18}$  eV). Al termine elencherò brevemente gli altri principali apparati in presa dati al momento.

LHAASO (Large High Altitude Air Shower Observatory) il cui *layout* è mostrato in figura 5, è un esperimento che racchiude tutte le principali caratteristiche descritte finora, è infatti stato concepito per la ricerca di sorgenti di fotoni da un'energia di qualche centinaio di GeV fino a qualche PeV, almeno, quindi deve essere in grado di selezionare gli eventi generati da protoni primari scartando gli sciame adronici. D'altra parte, questi sciame adronici sono eventi con i quali si possono fare studi legati ai raggi cosmici carichi. LHAASO è un esperimento realizzato in Cina, nella provincia del Sichuan a una quota di 4410 m s.l.m., ed è composto da tre apparati: LHAASO-KM2A un rivelatore distribuito su  $10^6$  m<sup>2</sup> composto da scintillatori non schermati (per la misura della componente elettromagnetica dello sciame: elettroni e fotoni); LHAASO-WCDA un sistema di tre piscine per un totale di 78000 m<sup>2</sup> posto al centro dell'esperimento per la misura degli sciame generati da primari di bassa energia; LHAASO-WFCTA composto da 18 telescopi per la misura della luce chernkov e/o di quella di fluorescenza. KM2A è l'apparato di grande superficie realizzato per coprire le energie più alte sia per la misura dei fotoni primari che per quella dei raggi cosmici carichi, ed è composto da due tipi di rivelatori ED (Electromagnetic Detector) e MD (Muon Detector). Il rivelatore ED è distribuito uniformemente su una superficie di 1.3 km<sup>2</sup> ed è composto da una parte centrale che comprende 4911 rivelatori dislocati in un area circolare di raggio 575 m su una griglia triangolare di lato 15 m e da un anello esterno composto da 305 rivelatori posti in un anello centrale che





**Figura 5:** Layout dell'esperimento LHAASO

circonda quello centrale di raggio esterno di 625 m, in questa regione più esterna i rivelatori sono dislocati su una griglia triangolare di lato 30 m. Il singolo rivelatore di ED è uno scintillatore plastico realizzato da quattro elementi di  $100 \times 25 \text{ cm}^2$ , di spessore 1 cm; in ogni elemento sono poste 12 fibre ottiche che raccolgono la luce emessa nello scintillatore e la convogliano verso un fotomoltiplicatore. Per aumentare la sensibilità ai fotoni compresi negli EAS e per migliorare la risoluzione temporale del rivelatore ogni scintillatore di ED è coperto da uno strato di 5 mm di piombo. Per aumentare il *range* dinamico del rivelatore il segnale è estratto sia dall'anodo che dal sesto dinodo del fotomoltiplicatore.

Il rivelatore MD consiste di 1196 rivelatori disposti nella regione interna, di raggio 575 m, di ED e sono localizzati su una griglia triangolare di lato 30 m. Il singolo rivelatore di MD è una vasca, con pareti riflettenti, di acqua purificata al cui interno le particelle cariche producono luce Čerenkov che viene misurata da un fotomoltiplicatore da otto pollici posto al centro dello strato superiore del rivelatore. Le vasche di acqua sono coperte da uno strato di terra che può raggiungere lo spessore di 2.5 m per assorbire le particelle della componente elettromagnetica degli sciami permettendo il passaggio dei soli muoni.

Al centro dell'esperimento è costruito il rivelatore denominato WCDA che è composto da tre piscine per una superficie totale di  $78000 \text{ m}^2$ , la profondità dell'acqua è di 4.4 m. L'acqua delle piscine è otticamente divisa da teli di plastica nera in celle elementari di  $5 \times 5 \text{ m}^2$ , al centro di ciascuna di queste sono posti due fotomoltiplicatori:

uno da 8 pollici e uno da 1.5 pollici per aumentare il *range* dinamico del rivelatore. Questo rivelatore è dedicato alle più basse energie cui è sensibile LHAASO e in particolare studia la radiazione cosmica tra 100 GeV e 30 TeV.

Per poter misurare il profilo longitudinale degli sciami (i.e. la luce di fluorescenza) e per rivelare la luce Čerenkov emessa negli sciami sono stati realizzati 18 telescopi a grande campo di vista (WFCTA). Ognuno di questi ha una superficie riflettente di  $5 \text{ m}^2$ , la luce riflessa è poi raccolta da un sistema di Silicon Photomultipliers (SiPM). Ogni telescopio è posto in un container che può essere spostato per poter realizzare diverse geometrie di misura a seconda dei diversi scopi osservativi.

## Altri esperimenti

Per concludere faccio una breve rassegna dei principali apparati per la misura degli EAS attualmente in presa dati, senza trattare gli esperimenti che lavorano a energie superiori a  $10^{18} \text{ eV}$  che sono discussi in un altro lavoro di questa pubblicazione.

Partendo dalle basse energie voglio ricordare i cosiddetti IACT (Imaging Atmospheric Čerenkov Telescopes) che non ho discusso in questo lavoro ma che hanno portato importanti risultati nella ricerca di sorgenti di fotoni per energie tra circa 100 GeV e 10 TeV. Attualmente sono in funzione tre esperimenti, il primo HESS [10] è localizzato in Namibia, nell'emisfero sud (con la possibilità quindi di osservare il centro della nostra galassia), composto da quattro telescopi di 12 m di diametro ciascuno al cui centro è poi stato recentemente aggiunto un quinto telescopio di 2.8 m di diametro. Gli altri due esperimenti sono costruiti nell'emisfero Nord: MAGIC [11] alle isole Canarie, due telescopi di 17 m di diametro e VERITAS [12] negli USA composto da 4 telescopi di 12 m di diametro.

Nell'emisfero Nord è attualmente in funzione, in Messico a una quota di 4100 m *s.l.m.*, l'esperimento HAWC [3] composto da 300 rivelatori di luce Čerenkov in acqua. Ciascun elemento è una tank di acqua purificata di diametro 7.3 m e di altezza 4m al cui interno sono posti quattro fotomoltiplicatori. Il tutto copre un'area di circa

22000 m<sup>2</sup> e i rivelatori hanno un *fill factor* del 57% circa.

Nel sito sperimentale della valle di TUNKA (Siberia) è stato realizzato un esperimento TAIGA [13] in cui operano sia rivelatori di luce Čerenkov dedicati alla misura dei primari carichi che IACT dedicati alla ricerca di sorgenti di fotoni di altissima energia.

Per i raggi cosmici carichi di origine galattica tra gli esperimenti attualmente in presa dati è importante menzionare ICE-TOP [14] che è stato realizzato al polo Sud al di sopra del rivelatore di neutrini astrofisici ICE-CUBE. ICE-TOP è composto da 80 elementi, ciascuno dei quali è realizzato con due rivelatori di luce Čerenkov nel ghiaccio, posti a una distanza di 125 m l'uno dall'altro. L'esperimento copre una superficie complessiva di circa 1 km<sup>2</sup>.

## Sviluppi futuri e conclusioni

Con gli esperimenti per la misura dei raggi cosmici da terra che ho brevemente descritto in questo lavoro si è aumentata la nostra conoscenza sulla radiazione cosmica di origine galattica.

Per la ricerca delle sorgenti di fotoni di energia superiore a circa 100 GeV sono state sviluppate due tecniche di misura tra loro complementari: gli IACT sono strumenti in grado di selezionare con grande accuratezza gli eventi generati da fotoni primari rispetto al fondo di eventi dovuti a primari adronici e con questi telescopi si ottengono misure con un'alta precisione angolare e una buona risoluzione energetica (circa 15-20%). D'altra parte questi osservatori hanno un piccolo campo di vista e un basso *duty cycle*, quindi sono molto indicati per osservare oggetti celesti già noti e studiarne nel dettaglio le caratteristiche. Con questi strumenti sono state osservate molte sorgenti sia galattiche (principalmente *Supernovae remnant* e *pulsar*) che extragalattiche (essenzialmente AGN e tra questi *blazar*) e sono recentemente stati osservati un paio di eventi sporadici, in particolare dei *gamma ray burst* che sono stati segnalati da esperimenti operanti su satelliti.

A fianco agli IACT anche con gli apparati a sciami si sono ottenuti dei notevoli risultati soprattutto per quanto riguarda l'estensione della misura delle sorgenti di fotoni oltre i 100 TeV e fino al PeV. Questi risultati sono stati prima otte-

nuti dagli esperimenti HAWC e TIBET-AS $\gamma$  e in seguito dall'esperimento cinese LHAASO. In particolare, quest'ultimo ha localizzato 13 sorgenti oltre i 100 TeV, tutte si trovano sul piano galattico (anche se non si è ancora osservato il centro della galassia). Questi risultati hanno aperto la strada all'astronomia ad energie superiori ai 100 TeV e ci aspettiamo grandi sviluppi in questo campo. A questo proposito segnalo il progetto SWGO [15] che si propone di realizzare un osservatorio a grande campo di vista, basato su rivelatori Čerenkov ad acqua, da costruire nell'emisfero sud a una quota superiore a 4500 m s.l.m. che possa osservare queste sorgenti tra 100 GeV e i PeV. Questi apparati a grande campo di vista, rispetto agli IACT, hanno *performance* meno buone (sia sulla selezione gamma/adroni che sulla precisione angolare ed energetica) ma grazie al loro grande *duty cycle* e campo di vista sono molto più indicati per la ricerca di sorgenti inattese e per la rivelazione di eventi sporadici come, per esempio, i *gamma ray burst*. Inoltre, questi esperimenti hanno una sensibilità anche migliore di quella degli IACT alle altissime energie ( $E > 100$  TeV).

Per quanto riguarda la misura dei raggi cosmici carichi di origine galattica, gli studi degli ultimi anni si sono concentrati sulla regione attorno al cambio di pendenza dello spettro primario dei raggi cosmici, il cosiddetto ginocchio osservato a circa  $3 - 4 \times 10^{15}$  eV, la cui origine è stata associata agli elementi più leggeri (H, He). Il cambio di pendenza della componente pesante (Fe) della radiazione cosmica è stato osservato a un'energia superiore (circa  $10^{17}$  eV) da parte dell'esperimento KASCADAE [5]. Bisogna però sottolineare come questi risultati sono stati ottenuti con esperimenti operanti molto al sotto del punto di massimo sviluppo degli sciami, mentre con i dati raccolti ad alta quota dall'esperimento ARGO-YBJ si è osservato un cambio di pendenza simile per la componente leggera dei primari a energia inferiore (circa 400 TeV).

In questo senso è fondamentale che gli apparati di prossima generazione (a partire da LHASSO) siano in grado di separare, con una selezione applicata ai singoli eventi, almeno due, ma possibilmente più, gruppi di massa. In questo modo si potranno misurare gli spettri della componente leggera e pesante dei raggi cosmici indagando la

questione aperta con i recenti dati citati in precedenza. Naturalmente se si riuscirà a separare anche un terzo (o magari anche un quarto) gruppo di massa la nostra conoscenza della radiazione cosmica sarebbe notevolmente migliorata. Se si riuscisse a separare questi gruppi di massa su una statistica molto alta di eventi sarebbe anche molto interessante investigare l'anisotropia della direzione di arrivo della radiazione cosmica per diversi gruppi di massa (risultato cui non si è ancora pervenuti).

Indico qui sotto alcuni testi per un approfondimento degli argomenti trattati.

- M. Spurio: *Particles and Astrophysics*, Springer, Berlino (2015).
- A. De Angelis, M. Pimenta: *Introduction to Particle and Astroparticle Physics*, Springer (Berlino) (2015).
- A. Matthews: *A Heitler model of extensive air showers*, *Astroparticle Physics*, 22 (2005) 387.
- J. A. Hinton, W. Hofmann: *Teraelectronvolt Astronomy*, arXiv:1006.5210v2, (2010)
- A. Haungs, H. Rebel, M. Roth: *Energy spectrum and mass composition of high-energy cosmic rays*, *Rep. Prog. Phys.*, 66 (2003) 1145.



- [1] R. Atkins et al.: *Milagrito, a TeV air shower array*, *Nucl. Inst. Meth. A*, 449 (2000) 478.
- [2] LHAASO collaboration: *The Large High Altitude Air Shower Observatory (LHAASO) Science Book (2021 Edition)*, *Chinese Physics C*, 46 (2022) 035001.
- [3] A.U. Abeysekara et al.: *Data Acquisition Architecture and Online Processing System for the HAWC gamma-ray observatory*, *Nucl. Inst. Meth. A*, 888 (2018) 138.
- [4] B. Bartoli et al.: *Calibration of the RPC charge readout in the ARGO-YBJ experiment with the iso-gradient method*, *Nucl. Inst. Meth. A*, 783 (2015) 68.
- [5] T. Antoni et al.: *The Cosmic ray experiment KASCADE*, *Nucl. Inst. Meth. A*, 513 (2003) 490.
- [6] D. Apel et al.: *The KASCADE-Grande experiment*, *Nucl. Inst. Meth. A*, 620 (2010) 202.
- [7] R.D. Monkhoev et al.: *The Tunka-Grande experiment*, *Jour. Inst.*, 12 (2017) C06019.

- [8] The Pierre Auger Collaboration: *The Pierre Auger Cosmic Ray Observatory*, *Nucl. Inst. Meth. A*, 798 (2015) 172.
- [9] T. Abu-Zayyad et al.: *The surface detector array of the Telescope Array experiment*, *Nucl. Inst. Meth. A*, 689 (2012) 87.
- [10] J.A. Hinton: *Status of the HESS project*, *New. Astron. Rev.*, 48 (2004) 331.
- [11] The MAGIC Collaboration: *The MAGIC telescope*, *Nucl. Inst. Meth. B*, 114 (2003) 247.
- [12] J. Holder et al.: *VERITAS: Status and Highlights*, arXiv:1111.1225 (2011).
- [13] N. M. Budnev et al.: *TAIGA - A hybrid array for high-energy gamma astronomy and cosmic-ray physics*, *Nucl. Inst. Meth. A*, 936 (2019) 254.
- [14] R. Abbasi et al.: *IceTop: the surface component of IceCube*, *Nucl. Inst. Meth. A*, 700 (2013) 188.
- [15] [www.swgo.org](http://www.swgo.org)



**Andrea Chiavassa:** è Professore Ordinario presso l'Università di Torino. Si interessa da anni allo studio dei raggi cosmici partecipando ad esperimenti condotti con apparati operanti a terra (e quindi nella misura degli EAS), in particolare ha contribuito agli esperimenti EAS-TOP e KASCADE-Grande.

