
Astroparticelle di altissima energia

La notte fu esplorata più del giorno perché era tanto più vasta. Il pensiero ha forzato i segreti, scippato conoscenze per allargare il campo della poca vita. Sbirciare l'infinito fa aumentare lo spazio, il respiro, la testa, di chi lo sta ad osservare.

Erri de Luca

Antonella Castellina

Osservatorio Astrofisico di Torino (INAF-OATO), Torino, Italy
INFN, Sezione di Torino, Torino, Italy

La fisica astro-particellare è un campo interdisciplinare giovane, che studia la radiazione e le particelle del cosmo utilizzando tecniche tipiche degli esperimenti di alta energia. Alcune di queste particelle cosmiche raggiungono energie incredibilmente elevate, ed il loro studio è uno degli argomenti più affascinanti dell'astrofisica moderna. Questi messaggeri ultra-energetici dallo spazio profondo possono raggiungere la Terra ed essere osservati con apparati sperimentali dedicati e ci forniscono informazioni ineguagliabili sulle loro sorgenti e sulla struttura dell'Universo.

Introduzione

Ogni giorno, in ogni istante, dal cielo piovono su di noi argento, oro, idrogeno, carbonio, ferro e altri elementi. Bombardano la Terra costantemente, da tutte le direzioni; possono provenire dal Sole, dalla nostra Galassia, dallo spazio extragalattico. Chiamati "radiazione dall'alto" dal loro scopritore Viktor Hess nel 1912, vennero

ribattezzati "raggi cosmici" da Robert Millikan, ma la loro natura è corpuscolare: sono in realtà particelle subatomiche, dai protoni ai nuclei più pesanti, e sarebbe più corretto definirle dunque astroparticelle, benchè il termine raggi cosmici sia ancora largamente utilizzato. È facile comprendere che maggiore è l'energia che devono ricevere al momento della produzione, maggiore sarà la difficoltà di produrli: in effetti, il flusso di raggi cosmici che arriva sulla Terra diminuisce molto rapidamente al crescere della loro energia. Su un m² di atmosfera, arrivano circa 10000 particelle/secondo con energia pari a circa 10⁹ eV¹, ma solo 10 particelle/ora se la loro energia è di 10¹² eV, fino a numeri incredibilmente bassi come 1 particella/km² ogni secolo alle massime energie misurate. Misure dirette dei raggi cosmici, ad esempio con apparati installati su palloni o su satelliti, sono possibili solo fino ad energie dell'ordine dei 10¹³ – 10¹⁴ eV; poi, a causa del loro bassissimo

¹l'elettronvolt, eV, è l'energia guadagnata (o persa) da un elettrone che si muove nel vuoto attraversando una differenza di potenziale di 1 Volt. Nel seguito, indicheremo spesso le energie in unità di exaelettronvolt: 1 EeV = 10¹⁸ eV.

flusso, le particelle devono essere registrate con installazioni di grandissima area, dunque poste a Terra, e studiate in modo indiretto attraverso i secondari che esse generano in atmosfera.

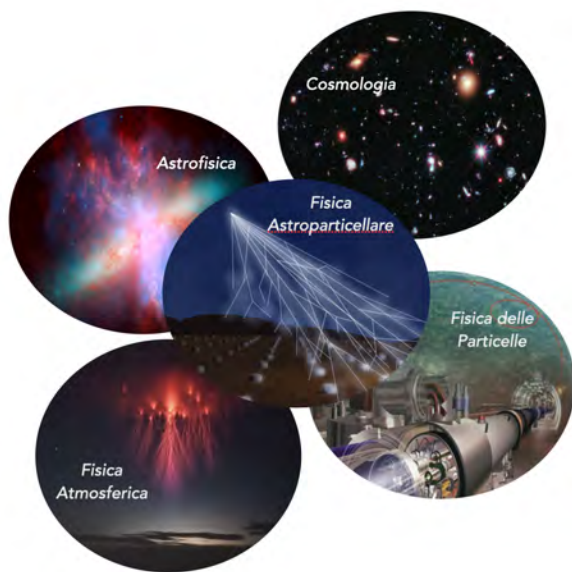


Figura 1: Le diverse connessioni della fisica astroparticellare con altri campi di ricerca.

I raggi cosmici di altissima energia (comunemente indicati con l'acronimo UHECR: *ultra-high energy cosmic rays*), definiti come particelle cosmiche di energia superiore a $\sim 10^{17}$ eV, rivestono un interesse particolare per la Fisica Astroparticellare [1].

Come evidenziato in Fig.1, questo campo è strettamente legato alla cosmologia ed all'astrofisica. Alle energie estreme in gioco, gli UHECR non possono più restare confinati nella nostra Galassia, e dunque devono avere origine extragalattica; non sappiamo ancora quali sorgenti cosmiche siano in grado di produrli ed accelerarli a valori così estremi. Lo studio degli UHECR riveste enorme importanza anche dal punto di vista della fisica fondamentale. È infatti l'unico modo di capire come interagiscono le particelle elementari ad energie altissime, non raggiungibili ai moderni acceleratori ed anche di esplorare possibili effetti fisici non previsti dal Modello Standard. Come vedremo, riuscire a registrare i secondari prodotti dagli UHECR richiede una profonda conoscenza dell'atmosfera terrestre; questo fornisce la possibilità di estendere le nostre conoscenze su effetti come i TGF (*Terre-*

trial Gamma Flashes) o gli ELVES, eventi luminosi che si manifestano in concomitanza con i fulmini.

Caccia alle sorgenti

Comprendere la natura delle sorgenti degli UHECR è uno dei problemi aperti dell'astrofisica particellare moderna. Nei modelli, detti *bottom-up*, le particelle vengono accelerate in ambienti astrofisici con meccanismi probabilmente legati a processi dovuti agli intensi campi magnetici ed elettrici presenti nelle sorgenti. Le possibili sorgenti devono garantire un certo numero di condizioni:

- la particella deve poter rimanere all'interno della sorgente mentre viene accelerata;
- la sorgente deve possedere la quantità di energia necessaria per accelerare le particelle ad energie così elevate;
- l'energia persa da una particella per radiazione nel campo accelerante oppure per interazione con le altre particelle presenti non deve superare il guadagno di energia;
- il numero totale e la potenza delle sorgenti deve essere in grado di fornire il flusso di UHECR osservato;
- i fotoni ed i neutrini generati nella sorgente candidata oppure durante la propagazione non devono superare i flussi osservati.

È stato ipotizzato, per esempio, che le particelle possano essere direttamente accelerate ad altissima energia in stelle di neutroni o pulsar, o in oggetti come le nane bianche, che sono altamente magnetizzate e in rapida rotazione. L'accelerazione sarebbe in questo caso rapidissima, ma gli UHECR perderebbero molta dell'energia acquistata prima di poter abbandonare la sorgente e cominciare il loro viaggio interstellare, a causa dell'alta densità di radiazione e di materia presente nell'ambiente della sorgente.

Un'altra possibilità è che l'energia cresca gradualmente a causa di incontri multipli con plasma magnetizzato, come ipotizzato da Enrico Fermi, oppure, più efficientemente, che le particelle siano accelerate da onde d'urto che si propagano nel mezzo interstellare. Questo tipo di accelerazione potrebbe avvenire per esempio nel disco della nostra Galassia, in radio Galassie giganti, o in nuclei galattici attivi (AGN) che emettono getti relativistici di materia nella direzione



Figura 2: Possibili candidati a sorgenti di astroparticelle di altissima energia.

ne dell'osservatore. In Fig.2 sono mostrati alcuni affascinanti esempi di possibili sorgenti di UHECR.

Un'origine più esotica è quella proposta dai modelli *top-down*, secondo i quali gli UHECR possono essere prodotti nel decadimento di particelle super pesanti con masse superiori a $\sim 10^{21}$ eV. Queste particelle possono essere metastabili, prodotte direttamente nell'Universo primordiale (materia oscura super pesante), oppure possono essere emesse da difetti topologici, prodotti attraverso una transizione di fase nel primo Universo. In questo scenario, i componenti principali del flusso di particelle UHE sono fotoni e neutrini da decadimenti di pioni neutri e carichi con solo un 10% di nucleoni.

Finora, non sono state trovate sorgenti individuali di UHECR. È possibile che le sorgenti siano tante ma deboli, oppure che i campi magnetici che permeano l'Universo siano così intensi da deviare considerevolmente le direzioni d'arrivo delle particelle cariche, e quindi rendere impossibile correlarne la direzione d'arrivo con l'origine. In effetti, conosciamo abbastanza bene il campo magnetico Galattico, modellato sulla base delle osservazioni con una componente regolare e una turbolenta, dell'ordine di pochi μG . Tutte le particelle cariche di energia inferiore a circa 1 EeV sono confinate nella Galassia, poichè il loro raggio

di curvatura nel campo magnetico risulta sempre molto inferiore allo spessore tipico del disco della Galassia (~ 300 pc)². Tuttavia non abbiamo modelli basati su osservazioni sperimentali per quanto riguarda il campo magnetico extragalattico, per cui gli studi si basano su simulazioni della formazione delle strutture cosmologiche. Questi campi possono avere intensità molto variabili, a seconda che li si calcoli per vuoti cosmici, filamenti, o altre strutture extragalattiche, con valori tra 10^{-17} e 10^{-9} G.

La propagazione

L'Universo è permeato di fotoni di diverse lunghezze d'onda. La radiazione termica di fondo (CMB, *cosmic microwave background*) è una radiazione elettromagnetica proveniente dall'epoca della ricombinazione, quando dal plasma primordiale nacquero i primi atomi e l'universo divenne trasparente alla luce.

La radiazione extragalattica di fondo (EBL, *extragalactic background light*) è invece la luce emessa da tutte le galassie nel corso della storia dell'Universo, dalle lunghezze d'onda dell'infrarosso fino al visibile e ultravioletto. Durante il loro viaggio nello spazio intergalattico, gli UHECR

²1 parsec equivale a 3.26 anni luce, o 3.086×10^{13} km.

Le interazioni durante la propagazione degli UHECR

Lo spazio è permeato di fotoni di diversa origine e diverse lunghezze d'onda, come mostrato nella figura.

L'interazione tra un nucleo di energia E , massa m (e dunque con fattore di Lorentz $\Gamma = E/m$) e massa atomica A ed un fotone del fondo cosmico di energia ϵ potrà avvenire, in base alle energie in gioco, per:

(a) produzione di coppie:

$N + \gamma \rightarrow N + e^+ + e^-$, per $E/A \gtrsim 0.2$ EeV.

(b) foto-produzione di pioni da parte dei protoni:

$p + \gamma \rightarrow p + \pi^0$, oppure $p + \gamma \rightarrow n + \pi^+$.

Avviene per $E/A \gtrsim 4$ EeV oppure $E/A \gtrsim 40$ EeV se sui fotoni EBL o CMB rispettivamente

(c) foto-disintegrazione del nucleo:

${}^A Z + \gamma \rightarrow {}^{A-1} Z + n$, o ${}^A Z + \gamma \rightarrow {}^{A-1} (Z-1) + p$.

Avviene per $E/A \gtrsim 20$ EeV se sui fotoni del CMB, oppure ad un valore 10 volte inferiore se sui fotoni EBL.

In particolare già nel 1965, poco dopo la scoperta del CMB, Greisen, Zatsepin e Kuzmin predissero l'esistenza di un *cut-off* nello spettro degli UHECR, causato dall'interazione dei protoni con i fotoni del CMB. Poiché l'energia tipica dei γ_{CMB} è $\simeq 10^{-3}$ eV, si può calcolare che l'energia a cui si osserva il *cut-off*, ormai conosciuto universalmente come il **cut-off GZK**, sia attorno ai $5 \cdot 10^{19}$ eV.

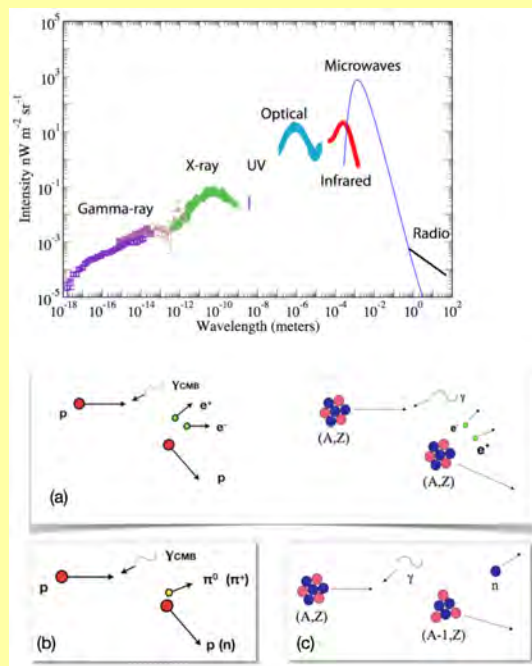


Figura 3: Il fondo di radiazione nello spazio extragalattico (in alto) e uno schema delle diverse interazioni che avvengono durante la propagazione.

possono interagire con questi fotoni, perdendo energia oppure dando origine a nuove particelle.

Ad energie inferiori a qualche EeV per i protoni e a qualche decina di EeV per i nuclei, le particelle perdono energia a causa dell'espansione dell'Universo. Al crescere dell'energia, nell'interazione possono essere prodotte coppie di elettroni e positroni. I protoni possono foto-produrre pioni carichi o neutri, mentre i nuclei subiscono processi più complessi di foto-disintegrazione. In quest'ultimo caso, una descrizione corretta della propagazione richiede un'incursione nel campo della fisica nucleare: occorre infatti conoscere le sezioni d'urto per le interazioni inelastiche e le sezioni d'urto inclusive.

La soppressione del flusso dei raggi cosmici alle energie più estreme è un dato osservativo molto solido, come vedremo, ma la sua interpre-

tazione è invece ancora oggi molto dibattuta: una delle possibilità è quella di attribuirlo al *cut-off* GZK, cioè alle perdite di energia dovute alla foto-produzione dei pioni da parte dei protoni per interazione sui fotoni del fondo cosmico di microonde. A causa dell'effetto GZK, maggiore è l'energia degli UHECR, minore sarà la distanza dalla quale possono arrivare: ad esempio, la stragrande maggioranza degli UHECR con energia superiore a ~ 60 EeV può arrivare fino a noi solo da distanze inferiori ai 150-200 Mpc. Dal punto di vista della ricerca delle sorgenti, questo è positivo: significa infatti che le sorgenti più lontane non contribuiscono al flusso osservato, rendendo più evidenti quelle vicine. Tuttavia, si potrebbe anche immaginare che esista un limite all'energia che le sorgenti possono dare agli UHECR: questo effetto potrebbe essere presen-

te insieme all'effetto GZK, oppure addirittura risultare quello dominante.

Misurare le astroparticelle

La misura dei raggi cosmici di altissima energia è possibile da Terra solo in modo indiretto: non si registrano direttamente i primari, ma soltanto i cosiddetti sciame estesi atmosferici (EAS, dall'inglese *Extensive Air Showers*) [2]. Un EAS è una cascata di particelle secondarie generate dall'interazione di un primario con un nucleo atmosferico, tipicamente tra 15 e 20 km di altezza.

La cascata si sviluppa in atmosfera fino a raggiungere un massimo numero di particelle secondarie; quando la loro energia non è più sufficiente a generare nuove particelle, lo sciame si attenua dissipando la sua energia per ionizzazione. La parte centrale dell'EAS è formata da adroni

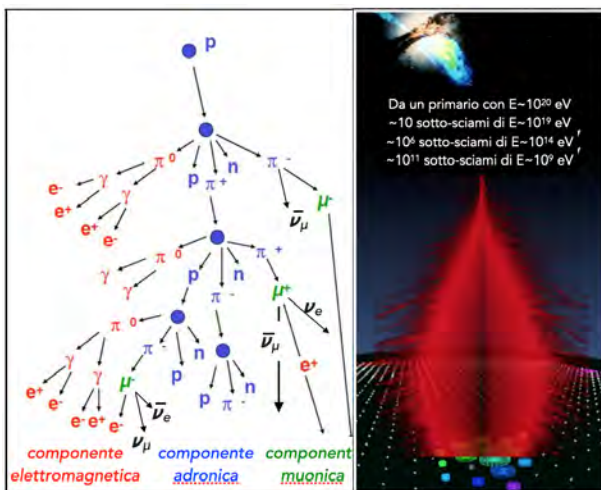


Figura 4: Schema di uno sciame atmosferico esteso. A lato, simulazione di uno sciame.

di alta energia, che attraverso la produzione ed il decadimento di pioni generano la componente elettromagnetica e la componente muonica. La prima è la più numerosa; è formata da fotoni, elettroni e positroni e trasporta circa l'85% dell'energia del primario. Dal decadimento dei pioni carichi vengono generati neutrini e muoni; questi ultimi, particelle circa 200 volte più pesanti degli elettroni, costituiscono la componente più penetrante dello sciame.

Oltre alla produzione di un enorme numero di particelle, gli sciame atmosferici generano anche diversi tipi di radiazione elettromagnetica.

I secondari carichi degli sciame eccitano le molecole di azoto nell'atmosfera che a loro volta, diseccitandosi, emettono una luce di fluorescenza, nella banda del vicino ultravioletto. L'efficienza di fluorescenza, cioè il rapporto tra l'energia emessa in fluorescenza dal gas eccitato e l'energia depositata dalle particelle cariche, è molto bassa, dell'ordine di $\sim 5 \times 10^{-5}$. Questa è la ragione per cui, solo alle energie più alte ($> 10^{17}$ eV), l'enorme numero di particelle permette di rilevare questa luce.

Si può inoltre avere emissione elettromagnetica nelle frequenze radio, attraverso due meccanismi diversi. Il più importante è quello geomagnetico, dovuto al moto di elettroni secondari e positroni degli sciame accelerati nel campo magnetico terrestre. Il secondo meccanismo, noto come effetto Askaryan, si basa sul fatto che l'aria è ionizzata dalle particelle dell'EAS e dunque si ha un eccesso di carica negativa sul fronte dello sciame; la variazione di carica nel tempo genera l'emissione.

Possiamo a questo punto definire le caratteristiche di un buon osservatorio per lo studio degli UHECR:

- a causa del loro bassissimo flusso, gli UHECR possono essere misurati con alta statistica soltanto installando un gran numero di rivelatori su vastissime aree;
 - la separazione tra i rivelatori deve essere regolata in modo da corrispondere all'estensione dello sciame al livello di osservazione (si va dalle decine di metri, per sciame di $E \sim 10^{15}$ eV, ai km, per gli array che studiano la regione di energia più estrema);
 - l'energia massima è limitata dall'area totale dell'esperimento, perché la statistica raccolta è proporzionale all'esposizione (cioè alla superficie per l'accettazione in angolo solido per il tempo di misura).
- Infine, è importante registrare quante più osservabili possibili, per massimizzare l'informazione e ridurre le incertezze sistematiche nelle misure.

L'Osservatorio Pierre Auger

Nel 1992, James Cronin e Alan Watson proposero di costruire un enorme insieme di rivelatori per studiare l'origine dei raggi cosmici delle più

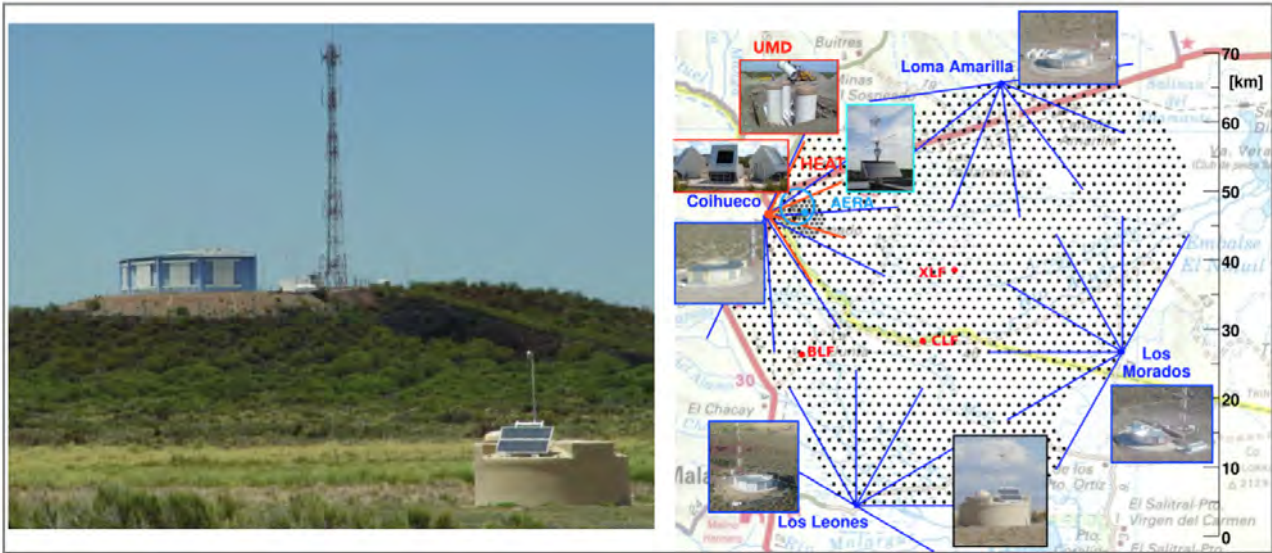


Figura 5: Un rivelatore di superficie nella Pampa; sul fondo sono visibili uno dei 4 siti con 6 telescopi di fluorescenza e la torre di comunicazione. A destra, lo schema dell'Osservatorio Pierre Auger coi suoi diversi rivelatori; ogni puntino nero corrisponde ad una stazione SD, le linee blu indicano il campo di vista dei telescopi nei 4 siti [3].

alte energie, i meccanismi della loro accelerazione, la loro energia e composizione di massa. La proposta trovò il sostegno e l'incoraggiamento della comunità scientifica e si realizzò nella costruzione dell'Osservatorio Pierre Auger in una vasta area della Pampa Argentina, presso la città di Malargüe. L'Osservatorio è ad oggi il più grande esperimento di fisica astroparticellare per le altissime energie mai realizzato [3].

Per poter ottenere il maggior numero possibile di informazioni, nell'Osservatorio si utilizza un sistema ibrido di rivelatori. Le 1600 stazioni Čerenkov ad acqua, poste a distanza mutua di 1.5 km su una griglia triangolare che copre 3000 km² di area, ne costituiscono il rivelatore di superficie (SD1500)³. Si basano sull'emissione di luce Čerenkov che le particelle relativistiche secondarie producono attraversando le 12 tonnellate di acqua contenute in ognuno dei rivelatori. Quattro siti posti attorno a quest'area, ciascuno con 6 telescopi di fluorescenza con angolo di elevazione da 1° a 30°, ne formano il rivelatore di fluorescenza (FD), per la misura della luce emessa dagli sciame attraversando l'atmosfera.

Nella parte nord-occidentale del sito sperimentale, 61 SD sono distribuiti in una griglia più densa con una distanza tra i rivelatori di 750 m (SD750), insieme a tre telescopi a fluorescenza

ad alta elevazione (HEAT), da 30° a 60°. Questa regione viene sfruttata per ampliare la regione energetica esplorabile fino a circa 10^{16.5} eV. Rivelatori a scintillazione con fibra ottica sono interati a fianco delle stazioni di SD750 per la misura diretta dei muoni degli sciame. L'Auger Engineering Radio Array (AERA) completa le misurazioni degli sciame di bassa energia rilevando la loro emissione radio grazie ad un array di più di 150 antenne. Diversi dispositivi di monitoraggio atmosferico sono inoltre impiegati per monitorare l'atmosfera. Mentre l'SD è operativo 24 ore al giorno, tutto l'anno, l'FD può funzionare solo nelle notti serene e senza luna, con un duty cycle pari a ~ 14%.

L'Osservatorio Pierre Auger è situato ad un'altitudine di 1400 m sopra il livello del mare, che corrisponde (per uno sciame verticale) a 750 g/cm². Nella Fig. 6 è schematizzata la ricostruzione di un evento ibrido in Auger cioè uno sciame che viene rilevato simultaneamente dall'FD e dall'SD. L'altitudine atmosferica viene misurata dal livello del mare ($h = 0$ km) fino ad $h \simeq 40$ km. Al contrario, la profondità atmosferica degli sciame si misura in g/cm² a partire dalla cima dell'atmosfera ($X = 0$) ed è definita come

$$X = \int \rho(h') dh' \quad (1)$$

dove $\rho(h')$ è la densità dell'aria ed h' è il cammi-

³Utilizziamo nel seguito gli acronimi inglesi: SD (Surface Detector) ed FD (Fluorescence Detector)

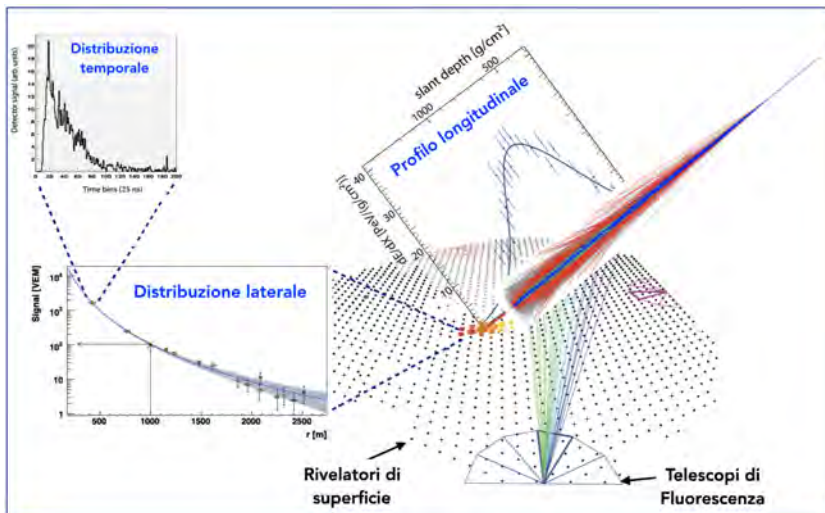


Figura 6: La misura di uno sciame esteso all'Osservatorio Pierre Auger. Con gli SD si determinano direzioni d'arrivo e punto d'impatto a terra dello sciame, e la distribuzione laterale, cioè la densità di particelle misurata in funzione della distanza dal core. In ogni stazione, si misura anche la distribuzione dei tempi d'arrivo delle particelle. Con gli FD si misura la distribuzione longitudinale, cioè l'energia depositata dallo sciame nell'attraversare l'atmosfera terrestre. Con le antenne radio si può misurare il segnale elettromagnetico nella regione di frequenza delle decine di MHz.

no percorso dall'EAS dal punto di ingresso in atmosfera lungo l'asse dello sciame (che coincide con la direzione d'arrivo del primario, ad un angolo θ rispetto coincide con la direzione d'arrivo del primario, ad un angolo θ rispetto alla verticale della superficie terrestre). Con questa definizione, risulta semplice descrivere lo sciame: in queste unità di misura le lunghezze di interazione ed attenuazione delle particelle risultano indipendenti dal mezzo in cui si propagano. Il punto d'impatto a terra dell'asse dello sciame viene comunemente chiamato il *core* dello sciame.

Poiché l'integrale della luce di fluorescenza è proporzionale all'energia del primario, usando l'FD, possiamo ottenere una misura quasi calorimetrica dell'energia elettromagnetica rilasciata in atmosfera e da questa, con una piccola correzione per tener conto dell'energia rilasciata in atmosfera in neutrini e muoni (detta energia invisibile E_{inv}), l'energia totale del primario:

$$E_{em} = \int_0^{\infty} dX \frac{dE}{dX}$$

$$E_{tot} = E_{em} + E_{inv} .$$

Utilizzando gli eventi ibridi, cioè gli sciami registrati simultaneamente dall'FD e dall'SD, possiamo correlare questa misura ad un parametro misurato con l'SD, la densità di particelle misurata a 1000 m dal *core*. In questo modo, la scala di energia dell'esperimento è ben definita per tutti gli eventi e quasi completamente indipendente dai modelli di interazione adronica, che a queste energie sono quanto mai incerti.

Le tre osservabili tipiche da ricostruire per

ogni evento registrato sono: l'energia, la direzione d'arrivo del primario, e la profondità di massimo sviluppo dello sciame in atmosfera. Nel caso degli eventi inclinati, inoltre, è possibile ricavare il numero di muoni e la profondità di massimo sviluppo della componente muonica, N_{μ} e X_{max}^{μ} . Nell'attraversare uno spessore atmosferico molto maggiore rispetto a sciami verticali, in questi eventi la componente elettromagnetica viene completamente assorbita, ed a terra arrivano soltanto i muoni.

Lo stato della ricerca

I risultati scientifici ottenuti dalla Collaborazione Pierre Auger coprono campi di ricerca diversi e complementari. La ricerca dell'origine degli UHECR si basa sulla misura dello spettro energetico e della composizione di massa dei primari, su studi di altri messaggeri neutri, i fotoni ed i neutrini, e su estese ricerche di anisotropia su scala angolare sia grande che intermedia. Oltre agli studi di tipo astrofisico, con i dati raccolti è possibile esplorare le caratteristiche delle interazioni adroniche ad energie inarrivabili agli acceleratori, e valutare l'esistenza di effetti di fisica non standard, come possibili violazioni dell'invarianza di Lorentz, o segnali di materia oscura super-pesante.

Anisotropie nel flusso degli UHECR

Il metodo più diretto per cercare di individuare le sorgenti degli UHECR è quello di studiare

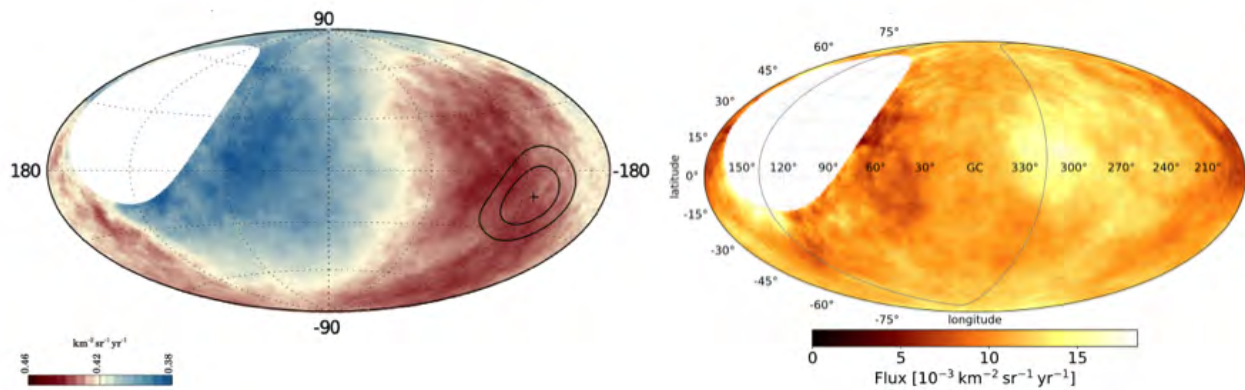


Figura 7: Il flusso degli UHECR in funzione delle coordinate Galattiche. A sinistra, per $E > 8 \text{ EeV}$; il dipolo è mostrato con una croce. A destra: per $E > 40 \text{ EeV}$; si nota l'eccesso in correlazione con NGC4945 ($305^\circ, 13^\circ$). In entrambi i casi, l'area bianca indica la parte di cielo non visibile dalla latitudine di Auger.

La misura dell'anisotropia

L'esposizione direzionale (area di raccolta degli eventi integrata nel tempo) in ascensione retta^a α è quasi uniforme per qualsiasi osservatorio a terra che operi con continuità nel tempo, grazie alla rotazione terrestre. Dati $N(\alpha)$ eventi misurati, un'analisi armonica permette di determinare le componenti di Fourier dell'armonica k : $a_k = (2/N) \sum_{i=1}^N \cos(k\alpha_i)$ e $b_k = (2/N) \sum_{i=1}^N \sin(k\alpha_i)$, e da esse l'ampiezza e la fase della modulazione della frequenza di eventi:

$$r_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2}; \quad \phi_k = \arctan(b_k/a_k)$$

Il caso più semplice di deviazione delle direzioni d'arrivo degli UHECR rispetto ad una distribuzione isotropa è quello di un puro dipolo ($k = 1$).

La probabilità di avere un valore di ampiezza maggiore di quello osservato solo per caso da un insieme isotropo di dati è pari a $P(> r_k) = \exp(-Nr_k^2/4)$. La significatività statistica del risultato si misura in numero di deviazioni standard σ dal valor medio atteso della distribuzione Gaussiana delle probabilità.

^aAscensione retta e declinazione (α e δ) sono le coordinate del sistema di riferimento equatoriale.

le loro direzioni d'arrivo e identificare possibili deviazioni da una loro distribuzione isotropa, eventualmente correlandole con qualche tipo di oggetto cosmico. Identificare tali anisotropie non è un compito semplice a causa dell'esistenza dei campi magnetici galattici ed extragalattici che deviano le direzioni degli UHECR, tanto più quanto minore è la rigidità delle particelle $R = E/Z$ dove E è l'energia e Z il numero atomico.

Le anisotropie possono verificarsi su una vasta gamma di scale angolari. Nella regione di energia più bassa, si esplorano scale di decine di gradi, poiché le deviazioni delle traiettorie degli UHECR sono troppo grandi per cercare sorgenti puntiformi. Ci aspettiamo ad esempio una deviazione dalla distribuzione isotropa a causa della diffusione e della fuga di particelle dalla Galassia, quando la loro energia diventa troppo alta perché il campo magnetico galattico possa mantenerle confinate all'interno. Alle energie più alte, d'altra parte, possiamo aspettarci rigidità più elevate e di conseguenza una maggiore possibilità di cercare sorgenti puntiformi o almeno anisotropie di scala intermedia.

L'enorme esposizione raggiunta all'Osservatorio Pierre Auger (circa $110,000 \text{ km}^2 \text{ sr yr}$) ha permesso di ottenere una statistica sufficiente a misurare un'anisotropia di dipolo di ampiezza pari al 5.9%, con una significatività statistica maggiore di 6σ [4]. La distribuzione del flusso degli UHECR per $E \geq 8 \text{ EeV}$ è mostrata nella Fig.7 in coordinate Galattiche. Il dipolo punta in direzione opposta al centro della nostra Galassia, dandoci una chiara indicazione del fatto



Figura 8: Centaurus A è la Galassia attiva più vicina alla Terra (~ 4.5 Mpc).



Figura 9: La Galassia starburst NGC253 (Galassia dello Scultore), a 2.7 Mpc dalla Terra.

che questi UHECR sono di origine extragalattica, un fatto previsto dalla teoria, ma solo grazie ad Auger ora confermato sperimentalmente⁴.

Ad energie molto superiori, è possibile provare a correlare le direzioni d'arrivo degli UHECR misurati a terra con le posizioni di eventuali possibili sorgenti (per esempio utilizzando i cataloghi di galassie forniti da esperimenti come Fermi-LAT, 2MRS, ecc.). Il flusso di UHECR misurato ad energie superiori a 40 EeV, utilizzando una griglia di 25° , viene mostrato nella Fig.7. L'area più interessante corrisponde alla regione del Centauro, che contiene Galassie importanti come

⁴È prassi consolidata nella fisica attribuire il significato di osservazione alle misure con significatività statistica $> 5\sigma$. Si parla invece di evidenza se la significatività è superiore a 3σ .

la radio-galassia Centaurus A, e galassie stellari come M83 e NGC4945; un ulteriore eccesso si trova vicino al Polo Sud Galattico, dove si trovano NGC1068 e NGC253.

La migliore significatività statistica, corrispondente a correlazioni con le *starburst galaxies* (SBG), è a livello di 4σ ; la correlazione con le posizioni indicate è interessante, ma ancora non sufficiente per concludere di aver identificato le sorgenti degli UHECR [5].

Uno studio completo dell'anisotropia richiede di poter osservare l'intero cielo. Questo è reso possibile dal lavoro congiunto della collaborazione Auger con Telescope Array, un esperimento volto anch'esso allo studio degli UHECR situato nell'emisfero Nord, nello Utah, di area pari a circa $1/4$ rispetto a quella di Auger [6]. La collaborazione tra i due gruppi ha consentito di confermare sia la misura del dipolo, che nel caso di una ricerca full-sky non dipende più da ipotesi di partenza sulla distribuzione angolare degli eventi, sia la correlazione con i cataloghi di diversi oggetti cosmici.

Spettro energetico e composizione

Lo spettro di energia degli UHECR è stato misurato in Auger utilizzando più di 200 mila eventi, in una regione di energia estremamente ampia, da $\sim 6 \times 10^{15}$ eV fino a $\sim 2 \times 10^{20}$ eV [7, 8]. Se si rappresenta il flusso moltiplicandolo per la terza potenza dell'energia in funzione dell'energia stessa, come in Fig.10, è possibile osservare alcuni cambi di pendenza, che sono estremamente informativi sui processi di produzione di queste astroparticelle. Le energie a cui essi sono osservati vengono generalmente indicati con nomi relativi all'anatomia della gamba: un secondo ginocchio (ne esiste un primo, attorno a $3 \cdot 10^{15}$ eV), energia a cui si presume completato il contributo dei raggi cosmici galattici; una caviglia (*ankle*, in inglese), nella regione di energia a cui si ha il passaggio da particelle di origine galattica ad extragalattica; il collo del piede (*instep*) è infine l'energia a cui comincia la soppressione del flusso.

Le caratteristiche degli sciami dipendono non solo dall'energia, ma anche dalla natura della particella primaria che li ha generati. A parità di energia iniziale la profondità atmosferica a cui si

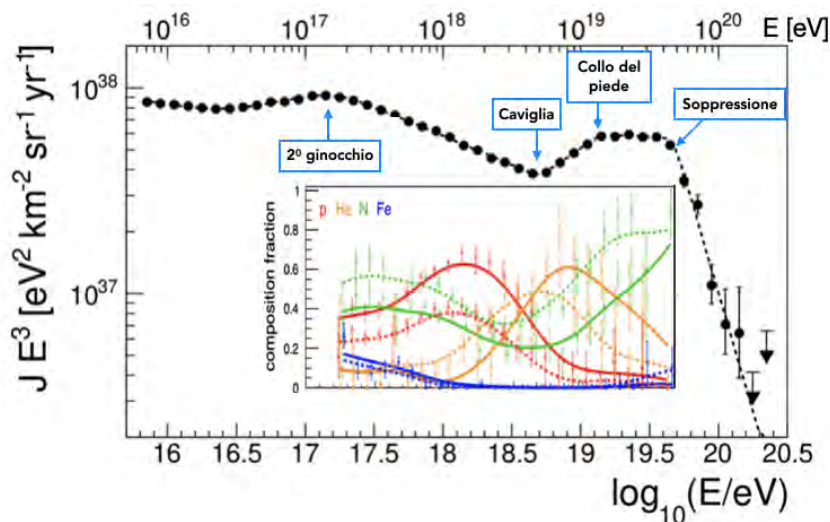


Figura 10: Il flusso degli UHECR in funzione dell'energia, moltiplicato per E^3 ad evidenziare i cambi di pendenza. Nell'inserto, si mostra la frazione di elementi di massa presenti nel fascio primario; le linee continue e tratteggiate si riferiscono a due diversi modelli di interazione adronica.

ha il massimo sviluppo dello sciame, X_{\max} , e il numero di muoni prodotti N_{μ} dipendono dalla massa della particella primaria: gli sciame originati da un protone si sviluppano più in basso nell'atmosfera, e contengono un numero minore di muoni rispetto ad uno sciame generato da un nucleo più pesante. In uno sciame generato invece da un fotone, la lunghezza di radiazione è maggiore di un fattore 2 rispetto a quella delle interazioni foto-nucleari; di conseguenza X_{\max} è molto più profondo (più vicino alla terra) rispetto a quello di uno sciame adronico alla stessa energia ed il contenuto di muoni è molto più basso.

Informazioni sulla massa dei primari possono essere ricavate dal valor medio e dalla varianza dei profili longitudinali, ($\langle X_{\max} \rangle$ e $\sigma^2(X_{\max})$; (si veda il riquadro "Misura della composizione"). Con sufficiente statistica, è possibile considerare le intere distribuzioni di X_{\max} e modellarle come sovrapposizione delle distribuzioni attese da gruppi di massa rappresentativi (di solito si usano protoni e nuclei di ${}^4\text{He}$, ${}^{14}\text{N}$, ${}^{28}\text{Si}$, ${}^{56}\text{Fe}$), con parametri che dipendono dal modello usato per descrivere le interazioni adroniche in atmosfera. Confrontando la convoluzione di queste distribuzioni con la distribuzione misurata, è quindi possibile determinare le frazioni di massa ad ogni energia che meglio descrivono i dati sperimentali; il risultato è mostrato nell'inserto di Fig.10.

Da un punto di vista astrofisico, è importante osservare come la composizione degli UHECR non sia costante, ma si evolva con l'energia; nella regione energetica fino a un po' prima del-

la caviglia dominano i nuclei più leggeri, poi appaiono nuclei sempre più pesanti [9].

Questo risultato, confermato in diverse analisi indipendenti, esclude che la regione di transizione ad un'origine extragalattica degli UHECR (attorno alla caviglia sia composta solo da primari leggeri ($p+\text{He}$), come previsto da alcuni modelli. Nella regione di energia più estrema la composizione è mista; poiché i nuclei subiscono maggiormente l'effetto delle deviazioni dovute ai campi magnetici extragalattici, diventa più complicato ricercarne le sorgenti seguendo le loro direzioni d'arrivo, a meno che la frazione dei protoni presenti non sia sufficientemente grande (non meno del 10%).

Sulla base dei risultati sperimentali su spettro e composizione, è possibile ricavare informazioni sulle caratteristiche delle possibili sorgenti. A partire da scenari astrofisici di cui si parametrizzano tipo di sorgenti e loro evoluzione cosmologica, masse delle particelle accelerate nella sorgente, forma dello spettro alla produzione, si possono infatti propagare le particelle accelerate fino a Terra, tenendo conto di tutte le possibili interazioni e perdite di energia, e ricavare spettro e composizione attesi.

Il confronto tra quantità attese e osservate permette, attraverso una procedura di *fit*, di determinare o limitare i parametri delle sorgenti. L'analisi combinata di spettro energetico e composizione di Auger suggerisce che la soppressione del flusso alle energie più estreme sia dovuta al raggiungimento della massima energia disponibile per accelerare particelle nelle sorgenti, piuttosto che ad effetti di propagazione [10]. Estendendo

La misura della composizione

Le osservabili più usate per ottenere informazioni sulla composizione sono la profondità media del massimo sviluppo degli sciami in atmosfera, $\langle X_{\max} \rangle$ e le sue fluttuazioni $\sigma^2(X_{\max})$, ed il numero di muoni N_{μ} . Per una composizione di nuclei mista all'ingresso in atmosfera, avremo che la profondità media può essere espressa come

$$\langle X_{\max}^A \rangle = \langle X_{\max}^p \rangle + f_E \langle \ln A \rangle$$

dove X_{\max}^p rappresenta la profondità media per il protone. Il parametro f_E dipende dalla frequenza di variazione di X_{\max} per decade di energia (detto *elongation rate*), e dalle caratteristiche delle interazioni adroniche. Le fluttuazioni di $\langle X_{\max}^A \rangle$ sono somma di fluttuazioni intrinseche, σ_{sh} , cioè le fluttuazioni nello sviluppo di sciami diversi generati dallo stesso tipo di nucleo, e quelle che derivano dalla dispersione dei valori di A nel fascio primario, $\sigma_{\ln A}$.

Il numero di muoni contenuto in uno sciami generato da un protone oppure da un nucleo di massa A è dato da

$$N_{\mu}^p \sim (E/\epsilon_d^{\pi})^{0.9}$$

$$N_{\mu}^A \sim N_{\mu}^p A^{0.1}$$

con ϵ_d^{π} pari all'energia di decadimento dei pioni carichi.

questo lavoro fino alle energie inferiori, sotto la caviglia, i dati di Auger risultano ben descritti da una componente galattica di massa intermedia (nuclei del gruppo CNO), unita a due componenti extragalattiche, una di protoni ed una di massa mista (composta cioè da p , He e altri nuclei fino al ferro) [11].

La presenza di raggi cosmici galattici a queste energie, ben superiori a quelle a cui essi possono essere accelerati da meccanismi standard (accelerazione in onde d'urto in residui di Supernova), suggerisce che esista una seconda componente galattica, dominata da elementi del gruppo CNO, generata ad esempio in esplosioni di supernovae nei venti di stelle di tipo

Wolf-Rayet⁵.

Multi-messaggeri dallo spazio

All'Osservatorio Pierre Auger è possibile registrare anche particelle neutre, fotoni e neutrini [12].

I neutrini possono viaggiare in percorsi rettilinei dai confini dell'Universo e sono in grado di attraversare grandi profondità di materia senza assorbimento. I neutrini astrofisici sono eccellenti messaggeri da sorgenti extragalattiche, generati nel decadimento dei pioni creati nelle interazioni dei raggi cosmici con la materia e/o con la radiazione nelle loro potenziali sorgenti. I neutrini cosmologici sono prodotti nell'interazione degli UHECR con i fotoni di fondo durante la propagazione.

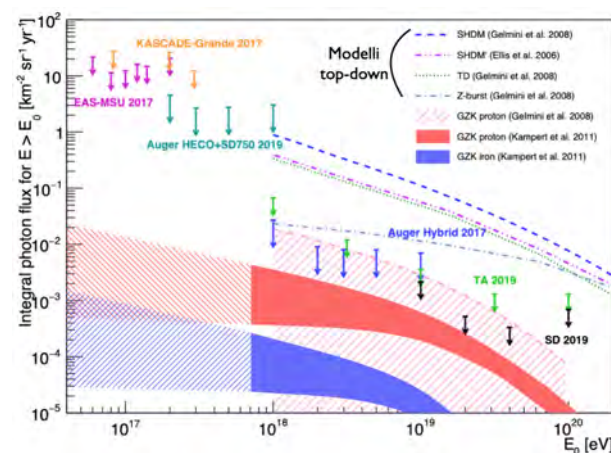


Figura 11: Limiti superiori al flusso di fotoni cosmogenici. Le linee tratteggiate mostrano le previsioni dei modelli top-down.

Identificare gli sciami generati da neutrini è relativamente facile, sulla base delle differenze dei loro profili longitudinali e laterali rispetto a quelli prodotti da sciami adronici provenienti da direzioni molto inclinate ($\theta > 60^\circ$). In quest'ultimo caso, infatti, l'atmosfera è abbastanza spessa (più di 3 atmosfere verticali!) da assorbire quasi completamente la componente elettromagnetica degli EAS quasi orizzontali, e la distribuzione dei secondari a terra risulta dunque dominata dai muoni. Al contrario, i neutrini, a causa della loro

⁵Le stelle di Wolf-Rayet sono stelle massicce, con masse iniziali superiori a 20 masse solari, in uno stadio avanzato della loro evoluzione. In base alla loro composizione, i loro spettri di emissione sono dominati o da He ed N o da He, C, O.

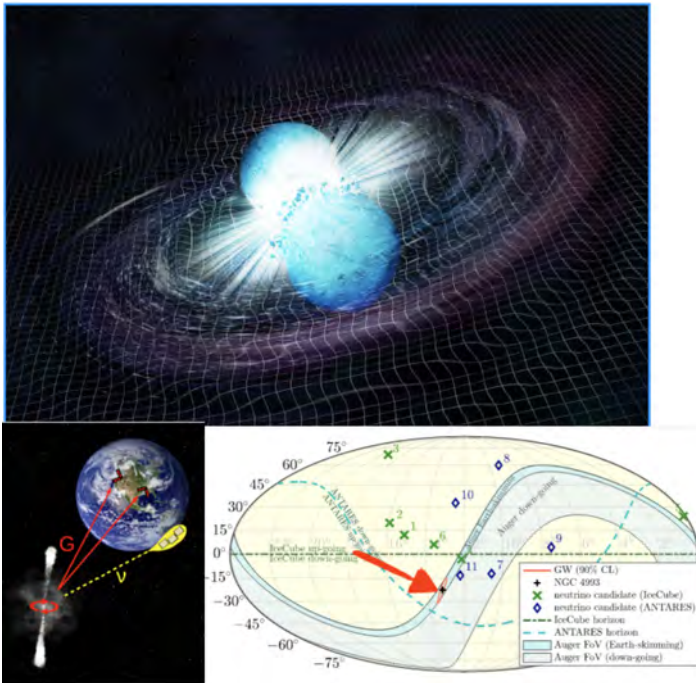


Figura 12: Schema della fusione di due stelle di neutroni che creano un buco nero, con emissione di onde gravitazionali. Oltre all'emissione di onde elettromagnetiche, questi eventi possono produrre neutrini, osservabili a Terra in apparati come IceCube (Polo Sud), ANTARES (Mar Mediterraneo), Auger (Argentina). L'evento GW170817 è stato localizzato in una regione di cielo (il cerchio rosso nel plot) corrispondente alla controparte ottica NGC4993 (croce nera). La sorgente si trovava appena sotto l'orizzonte, nel campo di vista ottimale per i neutrini nel caso di Auger, ma non degli altri Osservatori.

sezione d'urto estremamente piccola, possono interagire molto in basso in atmosfera, generando sciami ricchi di particelle elettromagnetiche vicino al rivelatore.

I fotoni di altissima energia possono derivare da una serie di processi:

- (a) fotoni cosmogenici possono essere prodotti durante la propagazione degli UHECR, nel processo GZK;
- (b) possono essere prodotti da interazioni adroniche dei raggi cosmici all'interno delle sorgenti o nel loro ambiente locale;
- (c) nei modelli *top-down* di produzione degli UHECR ci si attende un grande flusso di fotoni di altissima energia, prodotti nel decadimento di particelle super massicce come difetti topologici o particelle di materia oscura super-pesante.

A differenza dei neutrini, questi fotoni interagiscono con la radiazione di fondo extragalattica (EBL); la cascata elettromagnetica indotta si degrada fino a concludersi ad energie di $10^9 - 10^{12}$ eV. Sono quindi un mezzo per esplorare l'universo locale.

Anche gli sciami generati da fotoni hanno un basso contenuto in muoni e si sviluppano più in profondità dei raggi cosmici nell'atmosfera, e dunque sono abbastanza facilmente separabili dal fondo di sciami adronici.

Non è invece possibile separare gli sciami indotti dai neutroni da quelli generati da protoni. Tuttavia, poichè i neutroni sono direzionali, è in

linea di principio possibile identificare le loro sorgenti vicine: i neutroni possono infatti coprire distanze dell'ordine dei $9.2 \text{ kpc} \times E/\text{EeV}$. La distanza dalla Terra al Centro Galattico è di circa 8.3 kpc, e il raggio della Galassia è di circa 15 kpc. Si potrebbero quindi rivelare eventuali sorgenti nel disco galattico, compreso il centro galattico, sfruttando i neutroni di energia superiore a 1 EeV.

L'osservazione anche solo di un fotone o di un neutrino di altissima energia sarebbe un risultato davvero spettacolare, ma nessun evento di questo tipo è stato finora registrato (Fig.11).

Il fatto non è però negativo come sembra: la non-rilevazione di questi eventi è di per sé un dato sperimentale importante. Per esempio, i limiti superiori posti al flusso dei neutrini e dei fotoni cosmogenici hanno consentito di eliminare la maggior parte dei modelli di origine *top-down* degli UHECR e, nel caso dei fotoni, ha posto limiti piuttosto stretti alla massa e alla vita media di eventuali particelle di materia oscura super-pesante.

Un altro esempio è fornito dalla ricerca di neutrini in coincidenza con gli eventi di onde gravitazionali (Fig.12). La rivelazione di questi neutrini alle altissime energie, osservabili soltanto in Auger, può aiutare nella localizzazione delle sorgenti delle onde gravitazionali e consentire uno studio complementare dei loro progenitori astrofisici.

L'Osservatorio riceve e reagisce agli allarmi inviati dalla rete di rivelatori di onde gravitazionali, e fa parte dell'Astrophysical Multi-messenger Observatory Network, che riceve e distribuisce allarmi all'arrivo di eventi transienti particolarmente significativi tra un numero sempre crescente di osservatori nel mondo.

Fisica delle particelle con le astroparticelle

La capacità di dedurre la composizione nucleare dei raggi cosmici su base statistica si basa in larga misura sulla comprensione teorica delle interazioni adroniche che si verificano all'interno della cascata. Tuttavia, la produzione adronica di multiparticelle deve essere estrapolata ad energie che superano di gran lunga quelle raggiungibili negli acceleratori terrestri e in regioni dello spazio delle fasi non coperte dagli esperimenti al *collider* LHC del CERN. Le interazioni degli UHECR in atmosfera sondano infatti regioni di energia dell'ordine di $50 \lesssim \sqrt{s}/\text{TeV} \lesssim 450$, da confrontare con i 14 TeV raggiungibili a LHC negli urti protone-protone.

Misurando gli EAS è possibile verificare la validità delle estrapolazioni e dunque delle previsioni del Modello Standard delle particelle elementari. Per esempio, utilizzando le distribuzioni longitudinali degli sciami misurati con FD, in Auger è stata studiata la sezione d'urto protone-Aria fino ad energie dell'ordine dei 50 TeV, ricavandone, con l'uso di un modello fenomenologico, la sezione d'urto protone-protone (Fig.13), ben al di sopra della scala di energia di LHC [13].

Lo studio degli UHECR in Auger ha mostrato che tutti i modelli in uso descrivono bene la componente elettromagnetica degli sciami, ma ne sottostimano in modo significativo il numero di muoni. Questo deficit di muoni nei modelli inizia a vedersi attorno a 10^{17} eV, ed aumenta con il crescere dell'energia con una significatività di più di 8σ ; al contrario, le fluttuazioni nel numero di muoni sono ben riprodotte dai modelli. Le modifiche da apportare ai modelli per eliminare l'attuale deficit di muoni devono quindi essere tali da aumentare gradualmente

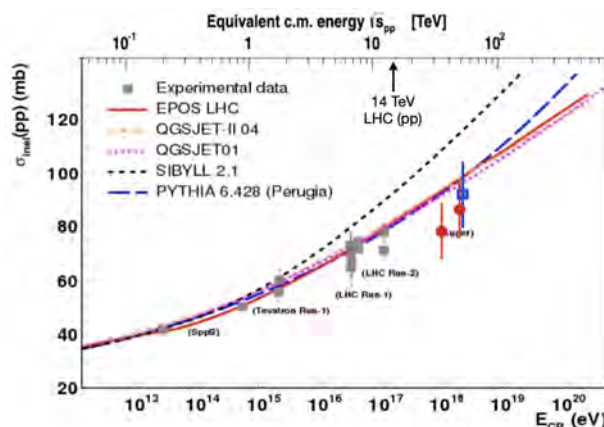


Figura 13: Sezione d'urto inelastica p - p ricavata dai dati di Auger (punti rossi e blu) confrontata con i risultati di alcuni modelli e con i dati dagli acceleratori.

la frazione adronica negli sciami senza alterare le fluttuazioni relative previste per i muoni [14].

Diversi risultati alle altissime energie sono stati ottenuti nella ricerca di effetti non previsti dal Modello Standard delle particelle.

Abbiamo visto come sia possibile porre limiti molto stringenti alla produzione di UHECR da parte di materia oscura superpesante grazie alle ricerche sui fotoni primari. La fisica delle astroparticelle è stata anche proposta come un ambiente di prova appropriato per la possibile violazione dell'invarianza di Lorentz (LIV), data la grande energia delle particelle, le enormi distanze di propagazione, l'accumulo di piccoli effetti di interazione e, recentemente, la precisione delle misure. La LIV viene descritta come modifica delle relazioni di dispersione⁶, che porterebbe ad un cambiamento nella cinematica delle interazioni causando modifiche nella propagazione extragalattica degli UHECR. I risultati di Auger in questo ambito permettono di limitare il livello di LIV possibile fino a 4 ordini di grandezza più di quanto fatto in precedenza [15].

⁶L'invarianza di Lorentz è uno dei pilastri della fisica moderna ed è stata verificata con diversi approcci sperimentali. In particolare, la massa a riposo m della particella è un'invariante di Lorentz legato all'energia E e all'impulso $p = |\mathbf{p}|$ misurati in qualsiasi sistema di riferimento dalla relazione $E^2 - p^2 c^2 = m^2 c^4$, dove c è la velocità della luce nel vuoto. Una sua violazione può essere espressa come $E^2 = p^2 c^2 + m^2 c^4 + \delta_n(E^n)$, dove δ_n esprime una correzione perturbativa di ordine n .

Cosmo-geofisica

Come visto in Fig.1, è possibile utilizzare le misure degli UHECR anche per studi di cosmo-geofisica. Sfruttando alcune delle caratteristiche uniche dei rivelatori di Auger, sono stati analizzati gli ELVES, eventi luminosi transitori che si verificano alla base della ionosfera, quando un forte impulso elettromagnetico viene emesso da un fulmine. La luce di fluorescenza generata in

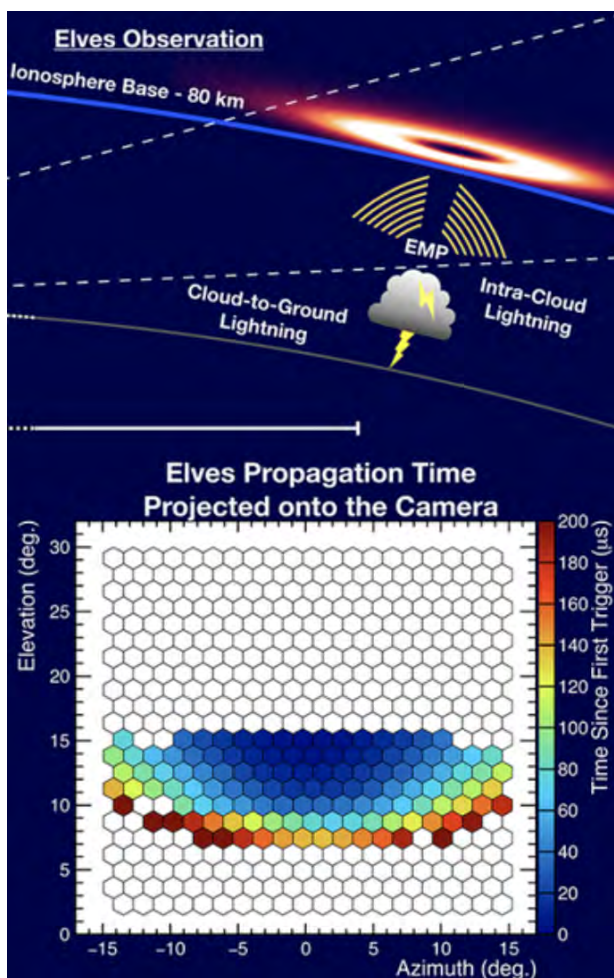


Figura 14: Schema di produzione di ELVES e immagine rilevata sulla camera di un telescopio FD.

atmosfera si propaga sotto forma di un anello in rapida espansione e può essere raccolta dai telescopi di Auger su aree fino a $\sim 10^6$ km², con una precisione senza precedenti grazie alla risoluzione temporale degli FD (100 nsec). Con questi studi si forniscono informazioni importanti sulle dinamiche degli acceleratori di plasma sul nostro pianeta, come quelli che si nascondono dietro il lampo di un fulmine [16]. L'Osservatorio è anche sensibile ai TGF (*terrestrial gamma-ray flashes*)

e alle diminuzioni nel flusso di raggi cosmici per effetto di attività solare (effetto Forbush).



Figura 15: Uno dei rivelatori di superficie di AugerPrime. Sono visibili sia il rivelatore a scintillazione (4 m²) che l'antenna radio installati sopra la stazione Čerenkov.

Il futuro

Si può certamente dire che viviamo un'epoca d'oro della fisica astroparticellare: grazie allo sviluppo tecnologico ed all'enorme numero di informazioni ottenute grazie agli osservatori attualmente in misura è nata l'astronomia multimessaggera, e si sono rafforzati i legami con la fisica delle particelle, l'astrofisica, la cosmologia.

L'enorme esposizione agli UHECR accumulata in particolare dall'Osservatorio Pierre Auger ha portato a grandi progressi nella comprensione delle loro proprietà, ma le ancora numerose incognite sulla natura e la distribuzione delle sorgenti, la composizione primaria e le interazioni adroniche sottostanti impediscono l'emergere di un quadro univocamente coerente.

I risultati attuali propongono nuove sfide:

- capire l'origine della soppressione del flusso, differenziando tra un *cut-off* dovuto agli effetti di propagazione oppure al raggiungimento dell'energia massima raggiunta nelle sorgenti. Questo ci permetterà di caratterizzare le eventuali sorgenti.
- valutare la possibile esistenza di una frazione di protoni alle più alte energie. La risposta a questa

domanda fondamentale porrà le basi per futuri esperimenti e valuterà la fattibilità dell'astronomia delle particelle cariche.

– aggiungere ulteriori informazioni sulle interazioni adroniche alle altissime energie, dove non possono arrivare le misure dei collider ed esplorare meccanismi non standard, previsti per esempio dalle teorie di gravità quantistica o nella teoria delle stringhe.

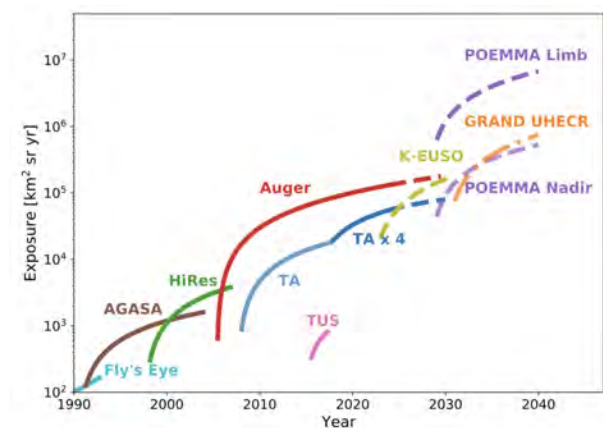


Figura 16: Confronto tra le esposizioni degli esperimenti passati (*Fly's Eye*, *AGASA*, *HiRes*), attuali (*Auger*, *Telescope Array*) e futuri (linee tratteggiate).

Per raggiungere questi obiettivi, è essenziale ottenere ulteriori misure di osservabili sensibili alla composizione su un campione statistico elevato di eventi ad altissima energia. Questo ha condotto la Collaborazione Pierre Auger ad effettuare un *upgrade* dell'Osservatorio, chiamato *AugerPrime* [17], in cui ad ogni rivelatore di superficie viene aggiunto un rivelatore a scintillazione ed un'antenna radio, vengono introdotti rivelatori posti a ~ 2.5 m sottoterra per la misura dei muoni e si ottimizzano risoluzioni temporali e range dinamico dei segnali. *AugerPrime* sarà dunque un Osservatorio di precisione, con lo scopo di misurare la composizione degli UHECR evento per evento, con una confidenza superiore al 50%.

È in corso attualmente anche l'*upgrade* di *Telescope Array* (*TAx4*) [18], con l'idea di avere anche nell'emisfero Nord un'esposizione agli UHECR paragonabile a quella di *Auger*.

Nel futuro più lontano, nuovi progetti potrebbero permettere la misura degli UHECR all'energia di soppressione ed oltre. L'osservatorio spaziale *Probe of MultiMessenger*

Astrophysics (*POEMMA*) [19] e l'osservatorio a terra multi-sito *Giant Radio Array for Neutrino Detection* (*GRAND*) [20] sono due strumenti che misureranno sia i neutrini UHE che i raggi cosmici. Il *Global Cosmic Ray Observatory* (*GCOS*) [21], in fase di studio, prevede due osservatori a terra, uno dei quali collocato con *GRAND*, per arrivare a 40 mila km^2 di area.

L'evoluzione delle esposizioni per i diversi esperimenti è mostrata in Fig.16; *AugerPrime* rimarrà l'esperimento *leader* nel campo della fisica degli UHECR per questo decennio. Si potranno raggiungere esposizioni 100 volte superiori con i rivelatori previsti dopo il 2030.

Lo studio dei raggi cosmici di altissima energia rimane uno dei più importanti punti chiave dell'affascinante campo della fisica astroparticellare per la comprensione e l'origine delle particelle più energetiche dell'Universo.

Un invito finale

Nel 2021, l'Osservatorio Pierre Auger ha reso disponibili pubblicamente il 10% dei suoi dati. Collegandosi al sito <https://opendata.auger.org/> è possibile per chiunque lo desideri scaricare i dati, visualizzare gli eventi, riprodurre alcune delle analisi che abbiamo descritto.

Appendice: lista delle sigle

AERA - *Auger Engineering Radio Array*
 AGN - *Active Galactic Nuclei*
 CMB - *Cosmic Microwave Background*
 EAS - *Extensive Active Shower*
 EBL - *Extragalactic Background Light*
 ELVES - *Emissions of Light and Very low frequency perturbations due to Electromagnetic pulse Sources*
 FD - *Fluorescence Detector*
 GRB - *Gamma Ray Burst*
 GZK - *Greisen, Zatsepin e Kuzmin*
 LIV - *Lorentz Invariance Violation*
 SBG - *Starburst Galaxies*
 SD - *Surface Detector*
 TDE - *Tidal Disruption Event*
 TGF - *Terrestrial Gamma-ray Flashes*
 UHE - *Ultra High Energy*
 UHECR - *Ultra High Energy Cosmic Rays*



- [1] R. Alves Batista et al., *Open questions in cosmic-ray research at ultrahigh energies*, *Front. Astron. Space Sci.*, 6 (2019) 23.
- [2] A. Castellina, F. Donato, *Astrophysics of Galactic Charged Cosmic Rays*, *Planets, Stars and Stellar Systems: Galactic Structure and Stellar Populations*, 5 (2011) 725.
- [3] Pierre Auger Coll., *The Pierre Auger Cosmic Ray Observatory*, *Nucl. Instrum. Meth. A* 798 (2015) 172.
- [4] Pierre Auger Coll., *Observation of a large-scale anisotropy in the arrival directions of cosmic rays above 8×10^{18} eV*, *Science*, 357 (2017) 1266.
- [5] Pierre Auger Coll., *An Indication of Anisotropy in Arrival Directions of Ultra-high-energy Cosmic Rays through Comparison to the Flux Pattern of Extragalactic Gamma-Ray Sources*, *Astrop. J.* 853 (2018) L29.
- [6] S. Ogio [Telescope Array Coll.], *Telescope Array experiment*, *EPJ Web of Conf.* 208 (2019) 08002.
- [7] Pierre Auger Coll., *Measurement of the cosmic-ray energy spectrum above 2.5×10^{18} eV using the Pierre Auger Observatory*, *Phys. Rev. D* 102 (2020) 062005.
- [8] V. Novotny [Pierre Auger Coll.], *Energy spectrum of cosmic rays measured using the Pierre Auger Observatory*, *Proc.37th Int.Cosmic Ray Conf. PoS(ICRC2021)*, 395 (2021) 324.
- [9] Pierre Auger Coll., *Inferences on mass composition and tests of hadronic interactions from 0.3 to 100 EeV using the water-Čerenkov detectors of the Pierre Auger Observatory*, *Phys. Rev. D* 96 (2017) 122003.
- [10] Pierre Auger Coll., *Combined fit of spectrum and composition data as measured by the Pierre Auger Observatory* *Journ. Cosmology and Astrop. Phys. A* 798 (2015) 172.
- [11] E. Guido [Pierre Auger Coll.], *Combined fit of the energy spectrum and mass composition across the ankle with the data measured at the Pierre Auger Observatory*, *Proc.37th Int.Cosmic Ray Conf. PoS(ICRC2021)*, 395 (2021) 311.
- [12] Pierre Auger Coll., *Multi-Messenger Physics With the Pierre Auger Observatory*, *Front. Astron. Space Sci.*, 6 (2019) 24.
- [13] Pierre Auger Coll., *Measurement of the Proton-Air Cross Section at $\sqrt{s} = 57$ TeV with the Pierre Auger Observatory*, *Phys. Rev. Lett.*, 109 (2012) 062002.
- [14] Pierre Auger Coll., *Measurement of the fluctuations in the number of muons in extensive air showers with the Pierre Auger Observatory*, *Phys. Rev. Lett.*, 126 (2021) 152002.
- [15] Pierre Auger Coll., *Testing effects of Lorentz Invariance Violation in the propagation of astroparticles with the Pierre Auger Observatory*, *Journ. Cosmology and Astrop. Phys.*, 01 (2022) 023.
- [16] Pierre Auger Coll., *A 3-Year Sample of Almost 1,600 Eaves Recorded Above South America by the Pierre Auger Cosmic-Ray Observatory*, *Earth and Space Sci.*, 7 (2020) e00582.
- [17] A. Castellina [Pierre Auger Coll.], *AugerPrime: the Pierre Auger Observatory Upgrade*, *Proc. Int. Cosmic Ray Conf. on UHECRs*, 210 (2019) 06002.
- [18] Telescope Array Coll., *Surface detectors of the TAx4 experiment*, *Nucl. Instr. Meth. A* 1019 (2021) 165726.
- [19] POEMMA Coll., *POEMMA's target-of-opportunity sensitivity to cosmic neutrino transient sources*, *Journ. Cosmology and Astrop. Phys.*, 06 (2021) 66.
- [20] GRAND Coll., *The Giant Radio Array for Neutrino Detection (GRAND): Science and design*, *Sci. China Phys., Mech. and Astron.* 63 (2020) 219501.
- [21] J. Hörandel [GCOS Coll.], *GCOS, The Global Cosmic Ray Observatory*, *Proc.37th Int.Cosmic Ray Conf., PoS(ICRC2021)* 395 (2021) 027



Antonella Castellina: è co-spokesperson dell'Osservatorio Pierre Auger e Primo Ricercatore dell'Osservatorio Astrofisico (INAF) di Torino.