

A caccia di raggi cosmici nella Pampa

Una rete di rivelatori su un territorio grande più di trenta volte la città di Firenze.

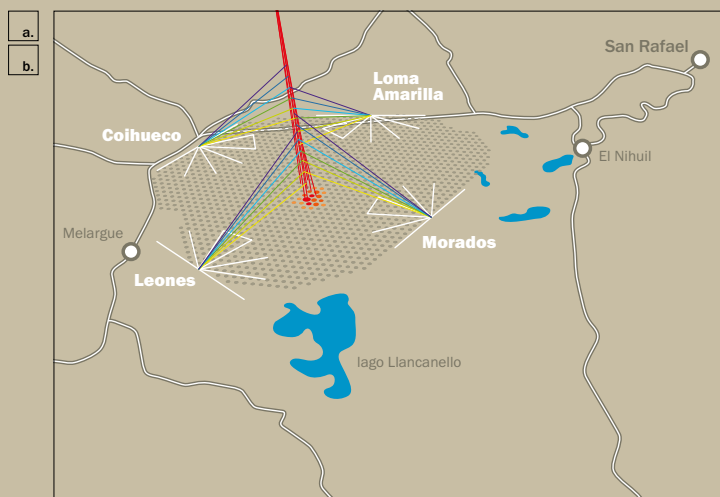
di Giorgio Matthiae e Francesca Scianitti

Malargüe, Argentina. Sull'altipiano Pampa Amarilla, a 1.400 metri di quota, migliaia di occhi sono in allerta. Osservano i raggi cosmici che inondano la Terra a energie anche mille volte più alte di quelle degli acceleratori più potenti del mondo, prodotti da eventi cosmici di proporzioni inimmaginabili. Il clima secco e temperato, il cielo libero, l'atmosfera rarefatta, l'inquinamento luminoso pressoché assente fanno di questo luogo a ridosso delle Ande un punto d'osservazione ideale. Distribuiti su 3.000 chilometri quadrati di terreno pianeggiante, gli occhi volti a cielo sono i rivelatori di Auger, il più grande osservatorio per raggi cosmici di altissima energia mai realizzato e il più imponente esperimento di fisica delle astroparticelle oggi esistente. Le particelle e i fotoni che bombardano ininterrottamente la Terra sono originati da fenomeni relativamente ordinari nel complesso degli avvenimenti cosmici. Ma ognuno di questi eventi, per noi invisibili e silenziosi, ha dimensioni colossali e libera enormi quantità di materia e di energia, di particelle e radiazione.

Le energie dei raggi cosmici possono variare moltissimo, raggiungendo anche valori superiori a centinaia di miliardi di miliardi di elettronvolt. I più energetici raggiungono l'atmosfera a velocità molto vicine alla velocità della luce, accelerati da meccanismi naturali di cui sappiamo ancora molto poco. E non sappiamo molto sull'origine dei raggi cosmici. A causa della carica elettrica, infatti, le particelle cosmiche sono soggette a numerose interazioni e deviazioni, dovute ai campi magnetici galattici ed extragalattici, che rendono difficile identificare il luogo che le ha generate. Queste deviazioni, tuttavia, sono importanti per i raggi cosmici di energia più bassa, ma

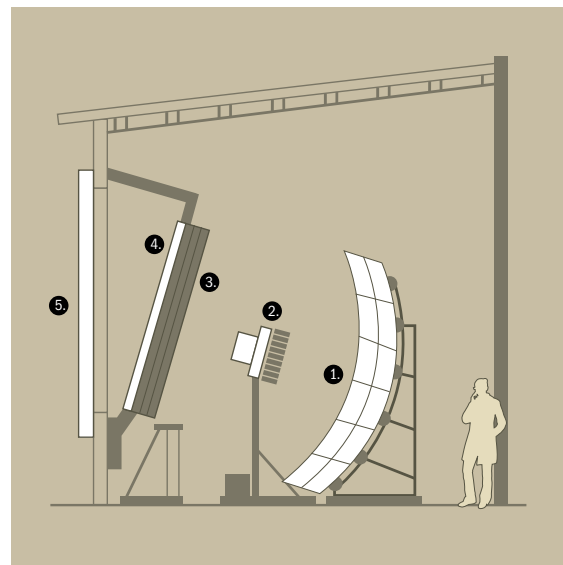
a.
Mappa del sito occupato da Auger, nella provincia argentina di Mendoza. Lo sciame cosmico che investe il territorio è visto dai rivelatori di superficie sottostanti e dai quattro telescopi a fluorescenza di Auger. Ogni telescopio registra la crescita e lo sviluppo dello sciame, fatto di miliardi di particelle secondarie.

b.
Uno dei 1.600 rivelatori di superficie di Auger, nella pampa argentina. Ogni rivelatore è dotato di antenna per la trasmissione dei dati ed è autoalimentato grazie alle batterie e ai pannelli solari.





c.



d.

hanno effetti più limitati sul percorso dei raggi cosmici di altissima energia. È quindi possibile, in questo secondo caso, risalire alla direzione di provenienza e ottenere preziose informazioni sulla sorgente che li ha emessi.

In prossimità della superficie terrestre, le informazioni portate dai raggi cosmici sono mediate dall'intervento dell'atmosfera. I raggi cosmici primari, infatti, perdono buona parte della loro energia nell'interazione con i nuclei dell'atmosfera, dando luogo a nuove particelle in un processo a cascata che si propaga verso terra lungo traiettorie ramificate, a formare un vero e proprio *sciame* di raggi cosmici secondari.

Una prolifica fase di ricerca sulle proprietà di questi fenomeni a cascata seguì, alla fine degli anni '20, la scoperta degli sciami atmosferici da parte del fisico francese Pierre Auger. Fu subito chiaro, infatti, che lo studio degli sciami secondari avrebbe permesso di risalire alle caratteristiche dei raggi cosmici primari di alta energia. I rivelatori estesi per sciami atmosferici, come quelli dell'esperimento Auger, rivelano particelle secondarie in numero proporzionale all'energia del raggio cosmico primario e i rari raggi cosmici di altissima energia sono in grado di produrre particelle secondarie in numero elevatissimo. L'osservatorio Auger è dedicato proprio allo studio dei raggi cosmici di altissima energia, al limite superiore dello spettro.

Il sistema di rivelazione di Auger è di tipo "ibrido" perché comprende rivelatori di diversa natura. È costituito, infatti, dalla combinazione di rivelatori "di superficie" (figg. b, c, f) e di

telescopi a fluorescenza (figg. d, e). I primi, 1.600 taniche d'acqua a 1,5 chilometri l'una dall'altra, osservano il fronte dello sciame di raggi cosmici quando colpisce la superficie terrestre, rivelando e contando le particelle prodotte al livello del suolo. I 24 telescopi distribuiti intorno ai rivelatori di superficie, d'altra parte, raccolgono i lampi di luce di fluorescenza prodotti nell'aria dalle particelle cariche dello sciame, osservandone così lo sviluppo longitudinale, lungo la direzione di provenienza. I rivelatori di superficie devono il loro funzionamento al fenomeno fisico che si manifesta quando una particella carica attraversa un mezzo materiale – l'acqua, nel caso di Auger – a velocità sufficientemente alta.

È l'effetto Cherenkov: un lampo di luce ultravioletta prodotto dal passaggio di particelle cariche nel liquido, a una velocità superiore a quella della luce nello stesso mezzo. La luce Cherenkov è dunque una sorta di "onda d'urto" che i rivelatori possono raccogliere grazie ai fotomoltiplicatori di cui sono dotati.

Nel caso dei telescopi, invece, il mezzo usato per la rivelazione è l'atmosfera stessa, i cui atomi emettono luce ultravioletta al passaggio dello sciame, per un effetto di fluorescenza. Nell'attraversare l'atmosfera, infatti, le particelle cariche dello sciame eccitano le molecole di azoto che, tornando allo "stato fondamentale", emettono luce ultravioletta. Grazie a entrambi questi metodi di rivelazione i ricercatori possono ottenere le informazioni necessarie a ricostruire l'energia e la direzione con la quale i raggi

c.
Rappresentazione artistica della rivelazione di uno sciame cosmico da parte dei rivelatori di superficie di Auger.

d.
Schema di uno dei 24 telescopi di fluorescenza di Auger.

1. specchio sferico
2. fotocamera PMT
3. diaframma
4. filtro
5. otturatore

cosmici sono pervenuti fino alla Terra, con una precisione molto superiore rispetto a precedenti esperimenti. Questo consente di formulare ipotesi sulla natura delle sorgenti di raggi cosmici di alta energia e sui meccanismi con cui essi sono accelerati alle enormi energie con cui raggiungono l'atmosfera terrestre. In funzione già da diversi anni, Auger ha raggiunto il massimo potenziale operativo con tutta la rete di rivelatori attivi nell'autunno dello scorso anno. I primi risultati sono stati pubblicati nel 2007 e hanno permesso di ottenere preziose informazioni sulle proprietà delle particelle di altissima energia. In particolare, l'andamento del flusso dei raggi cosmici in funzione dell'energia mostra una "caviglia", cioè una variazione netta di andamento, in corrispondenza dell'energia di 4×10^{18} eV (vedi fg. h, p. 31). Questa struttura è probabilmente collegata al passaggio, a energie elevate, da particelle di origine galattica a particelle di origine extragalattica (fig. h). I ricercatori impegnati

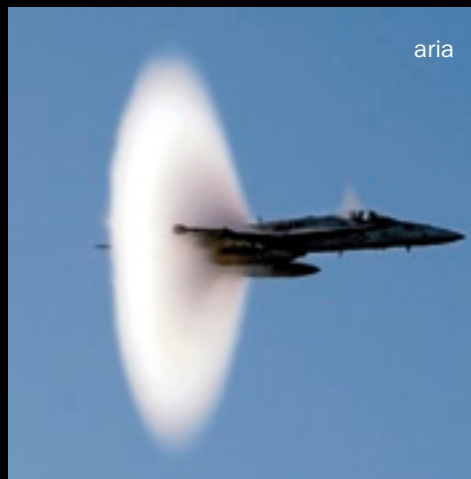


e.

e. Uno dei quattro edifici contenenti ciascuno 6 dei 24 telescopi a fluorescenza. I quattro edifici si trovano sul perimetro della zona occupata dall'intera rete di rivelatori di Auger.

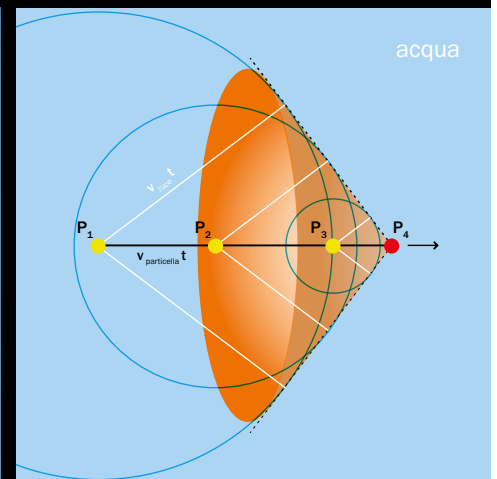
[as] box

L'effetto Cherenkov



Nell'immagine di sinistra, un aereo supersonico crea al suo passaggio un cono d'aria condensata: l'effetto è dovuto all'onda d'urto generata dal moto dell'aereo in aria a una velocità superiore alla velocità del suono. Nella figura di destra è rappresentato l'effetto Cherenkov dovuto al passaggio di una particella carica in un mezzo materiale, come l'acqua, a una velocità superiore alla velocità della luce nello stesso mezzo. È mostrato in particolare l'istante t in cui

la particella si trova nella posizione P_4 . Il cono di luce che segue la particella è dovuto all'involuppo delle onde elettromagnetiche emesse ad ogni passo precedente: all'istante t i diversi fronti d'onda sferici si sovrappongono a formare un cono. L'apertura del cono Cherenkov dipende dalla velocità della particella e dall'indice di rifrazione dell'acqua, n (in un mezzo con indice di rifrazione n , infatti, la velocità della luce si riduce al valore c/n). I due fenomeni sono accumulati



dal fatto che l'aereo e la particella viaggiano a una velocità superiore a quella con cui si trasmette il segnale generato dal loro passaggio: l'onda sonora nel caso dell'aereo che rompe la barriera del suono, e l'onda elettromagnetica per la particella. "Superando" il segnale, l'aereo e la particella provocano un effetto d'urto che si manifesta in un caso, come una vera e propria onda d'urto, mentre nel caso della particella il moto provoca un flash ultravioletto, la luce Cherenkov.

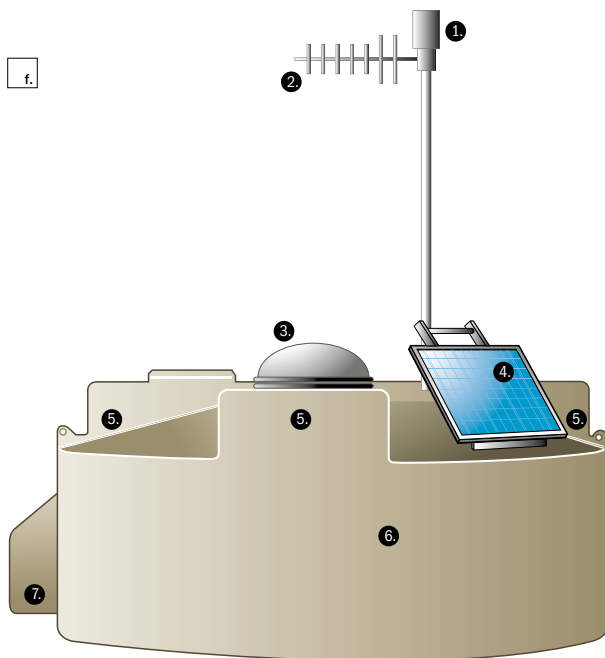
in Auger hanno potuto inoltre confermare l'evidenza di un calo nel flusso dei raggi cosmici alle più alte energie. Questa diminuzione sembrerebbe consistente con l'idea che attraversando lo spazio extragalattico, i raggi cosmici interagiscono con i fotoni del fondo cosmico a microonde (Cmb, *Cosmic Microwave Background*) – la radiazione residua del Big Bang – perdendo parte della loro energia. L'interazione dei raggi cosmici con il fondo a microonde fu prevista teoricamente dallo scienziato americano Kenneth Greisen e dai sovietici Georgiy Zatsepin e Vadim Kuz'min, nel 1966, e si manifesta con un calo netto di flusso nella distribuzione energetica (*taglio Gzk*) per energie superiori a circa 4×10^{19} eV. Se dotati di energia sufficientemente elevata, infatti, i protoni possono interagire con i fotoni della radiazione cosmica di fondo, producendo pioni e perdendo quindi parte della loro energia iniziale. L'effetto Gzk pone così un limite all'energia massima dei raggi cosmici provenienti da altre galassie e osservabili sulla Terra. Se l'osservazione del taglio Gzk costituisce già di per sé un'indicazione del fatto che i raggi cosmici rivelati al limite dello spettro di energia sono di origine extragalattica, gli scienziati della

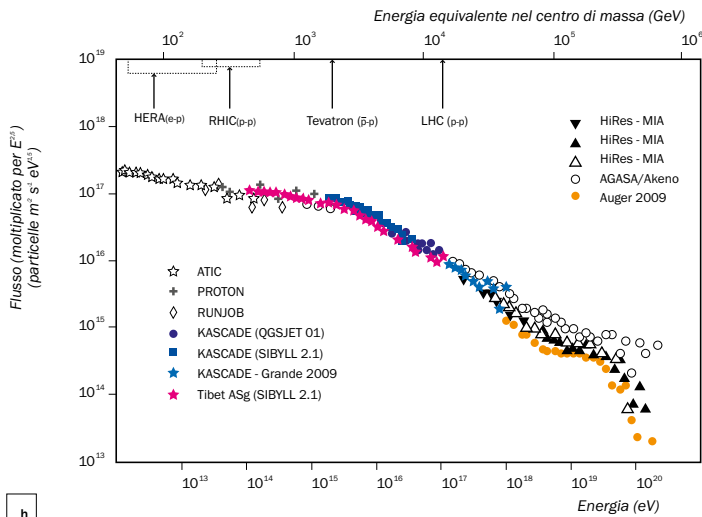
collaborazione Auger stanno ora cercando di identificare le sorgenti: le galassie, cioè, in cui queste particelle sono generate. Lo studio è eseguito confrontando le direzioni dei raggi cosmici misurate a terra con la posizione nella sfera celeste delle galassie riportate nei cataloghi oggi disponibili, in particolare con i cataloghi di galassie con nuclei attivi (Agn, *Active Galactic Nuclei*). Al loro centro, queste galassie mostrano una regione compatta caratterizzata da un'elevata emissione di radiazione, estesa su tutto lo spettro elettromagnetico, dalle onde radio ai più energetici raggi gamma. Si ritiene che il fenomeno sia dovuto al processo di accrescimento di un buco nero al centro della galassia, che inglobando materia produrrebbe intensi getti di radiazione elettromagnetica. A causa del taglio Gzk, i raggi cosmici che raggiungono la Terra a energie molto elevate non possono avere percorso distanze eccessive. Per questo, le possibili sorgenti di raggi cosmici di altissima energia possono essere individuate solo tra le galassie Agn più vicine, con distanze dell'ordine di circa 300 milioni di anni luce. Entro queste distanze la distribuzione spaziale della materia extragalattica, in particolare delle galassie Agn, è molto disomogenea.

f. Uno dei rivelatori di superficie o *tank*. La *tank* è un contenitore di plastica riempito di acqua dove le particelle cariche dello sciame (elettroni, positroni e muoni) producono luce Cherenkov rivelata da tre fotomoltiplicatori (PMTs). L'analisi dei segnali è fatta in loco e i dati sono trasmessi via radio al sistema di acquisizione dell'Osservatorio. La sincronizzazione delle diverse *tank* avviene mediante il sistema Gps.

1. antenna Gps
2. antenna per la comunicazione
3. elettronica
4. pannello solare
5. fotomoltiplicatori
6. contenitore di plastica
7. batteria

g. L'Osservatorio Pierre Auger, a cui l'Argentina ha anche dedicato un francobollo, è stato progettato e realizzato da una vasta collaborazione internazionale che include più di 70 enti di ricerca da Argentina, Australia, Bolivia, Brasile, Repubblica ceca, Francia, Germania, Italia, Messico, Paesi Bassi, Polonia, Portogallo, Slovenia, Spagna, Regno Unito, Usa e Vietnam.

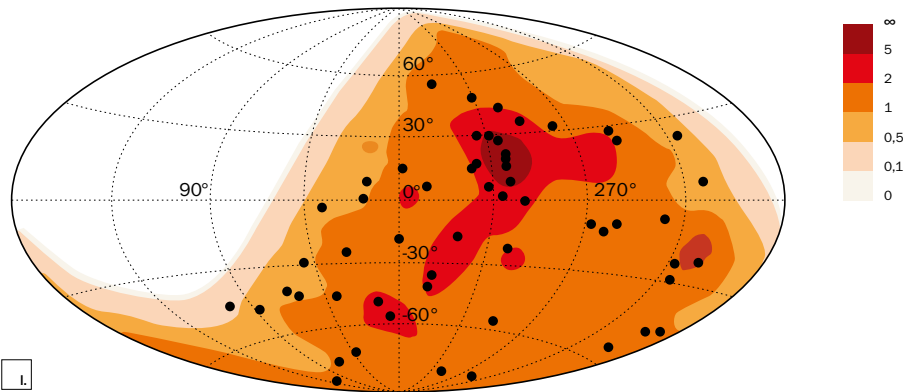




h.



i.



l.

La collaborazione Auger ha confrontato le direzioni osservate dei raggi cosmici di alta energia con la distribuzione delle galassie Agn emettitrici di raggi X, classificate in base ai dati del satellite Swift della Nasa – una collaborazione, alla quale partecipano anche Italia e Regno Unito, che studia l'origine dei *gamma ray burst* e l'Universo lontano (fig. l). Il catalogo Swift-Bat (*Burst Alert Telescope* di Swift) mostra una correlazione con gli eventi di alta energia di Auger, che sono difatti localizzati preferenzialmente nella regione della sfera celeste dove è presente una maggiore densità di galassie. A causa dello scarso numero di eventi osservati fino a oggi, questa osservazione non può essere conclusiva, ma dà una forte indicazione sulla provenienza dei raggi cosmici di alta energia da particolari tipi di galassie.

Biografia

Giorgio Matthiae è professore del Dipartimento di Fisica dell'Università di Roma Tor Vergata. Partecipa all'esperimento Auger dal 1998 e dal 2007 è responsabile internazionale della collaborazione.

Link sul web

www.auger.org

<http://auger-ed.lngs.infn.it/ED/>

www.phys.psu.edu/~coutu/Auger_Google_Earth.htm

h.

Flusso dei raggi cosmici primari, provenienti dallo spazio esterno alla Terra, in funzione dell'energia E . Nella regione ad alta energia sono rilevanti i dati dell'esperimento HiRes e quelli più recenti di Auger. È anche riportata per confronto l'energia ottenibile con gli acceleratori Lhc, al Cern, e Tevatron negli Stati Uniti, per le collisione tra protoni. Ad alta energia sono chiaramente visibili:

- una variazione della pendenza all'energia di circa 4×10^{18} eV, chiamata cavigliia (*ankle*, in inglese);
- una forte riduzione dell'intensità per energie superiori a circa 4×10^{19} eV, chiamata taglio GzK.

i.

Si ritiene che tra le sorgenti più probabili di raggi cosmici di alta energia vi siano le galassie con nuclei attivi, regioni compatte al centro della galassia caratterizzate da un'elevata emissione di radiazione, dovuta con buona probabilità al processo di accrescimento di un buco nero.

l.

Mapa del cielo in coordinate galattiche. I 58 eventi dell'Osservatorio Auger con energia superiore a $5,5 \times 10^{19}$ eV sono rappresentati con punti neri, mentre con diverse gradazioni dal giallo al rosso è rappresentata la densità di galassie Agn dal catalogo Swift-Bat, entro una distanza di circa 600 milioni di anni luce. Si nota una concentrazione di eventi nella zona ad alta densità di galassie (marrone scuro).