
Raggi cosmici, ieri, oggi, domani

Alessandro De Angelis

*Dipartimento di Fisica e Astronomia "Galilei" dell'Università di Padova, INFN e INAF
Instituto Superior Técnico dell'Università di Lisbona*

Scoperti all'inizio del XX secolo, i raggi cosmici sono particelle di energie molto elevate (fino a un miliardo di TeV) che raggiungono la Terra in provenienza da acceleratori extraterrestri il cui meccanismo di funzionamento non è ancora pienamente compreso. Sono un potente strumento per indagare la fisica fondamentale, e in modo complementare possono spiegarci interessantissimi fenomeni astrofisici, in particolare quelli che avvengono in prossimità di oggetti compatti. Possono far progredire la nostra conoscenza dell'Universo su larga scala, dalla cosmologia alla ricerca sulle origini della vita. La rinnovata attenzione degli scienziati per i raggi cosmici ha portato negli ultimi anni al fiorire di attività sperimentali e teoriche nei campi chiamati fisica astroparticellare e astronomia multimessaggero.

Che cosa sono i raggi cosmici?

Ogni secondo, particelle ad alta energia (sopra ~ 1 GeV) di origine extraterrestre raggiungono la Terra. Portano messaggi da regioni dove avvengono fenomeni altamente energetici che non possiamo esplorare direttamente. Sono chiamate raggi cosmici, ed è naturale cercare di utilizzarle per studiare la fisica di questi fenomeni [1, 2]. I raggi cosmici sono prevalentemente protoni, con

circa il 10% di nuclei di elio, e una piccola, anche se molto importante, frazione di elettroni, positroni, raggi gamma e neutrini (chiamo in questo articolo raggi cosmici tutte le particelle di origine extraterrestre – alcuni invece definiscono come raggi cosmici solo i nuclei, o solo protoni e ioni, cioè separano raggi gamma e neutrini dai raggi cosmici).

Lo spettro di energia dei raggi cosmici (Fig. 1) è approssimativamente descritto da una legge di potenza E^{-p} , con p intorno a 3 in media. Prima di andare più in dettaglio, una breve introduzione sulle unità di misura usate nella fisica delle particelle.

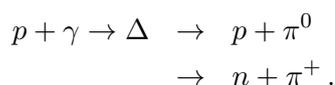
Un elettron-volt (eV) è la quantità di energia acquistata da una particella con carica elettrica unitaria, per esempio un elettrone o un protone, quando viene accelerata tra due punti fra cui ci sia una differenza di potenziale di 1 volt. L'elettron-volt è circa l'energia della luce visibile, ed è una scala naturale per i fenomeni chimico-fisici in cui la luce viene generata o assorbita (transizioni di elettroni nei livelli esterni degli atomi o nei cristalli, ad esempio nella fotosintesi delle piante), ma è un'unità piuttosto piccola rispetto ai fenomeni macroscopici: vale infatti circa 1.5×10^{-19} joule, dove il joule è l'unità di misura del sistema internazionale.

Le energie caratteristiche degli elettroni più interni di un atomo sono invece dell'ordine dei keV (1 keV = 1000 eV), e sono caratteristiche dei cosiddetti raggi X. Le energie che legano i protoni

nei nuclei sono ancora maggiori, dell'ordine dei MeV ($1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV} = 1000000 \text{ eV}$); qui cominciano i cosiddetti raggi gamma. Arrivati a 1 GeV, ossia un miliardo (10^9) di eV, abbiamo un'energia sufficiente a creare un protone compatibilmente con la famosa relazione di Einstein $E = mc^2$. Una zanzara ha un'energia cinetica di circa 1000 GeV, o 1 TeV, e l'energia dei fasci dell'acceleratore LHC al CERN di Ginevra, il più potente acceleratore artificiale, è di 7 TeV. 1000 TeV fanno un PeV, e 100 PeV fanno un EeV, cioè 10^{18} eV (e qui ci avviciniamo a un joule).

Ora andiamo nel dettaglio della dipendenza del flusso dei raggi cosmici dall'energia. Dopo una regione intorno al GeV dominata dai raggi cosmici prodotti o moderati dal Sole, lo spettro diventa più ripido ($p \sim 2.7$) per valori di energia inferiori a 1000 TeV, cioè 1 PeV (circa 150 volte l'energia massima dei fasci del collisore LHC al CERN); sappiamo che questa regione di energia è dominata dai raggi cosmici prodotti da sorgenti astrofisiche nella nostra Galassia. Per energie più elevate si verifica un ulteriore irrigidimento ($p \sim 3.3$); la regione in cui avviene questo cambiamento di pendenza è chiamata **ginocchio**. I raggi cosmici sopra il ginocchio sono prodotti principalmente da sorgenti extragalattiche, per lo più buchi neri supermassicci che crescono al centro di altre galassie. Per energie ancora più alte (oltre $\sim 10^{18} \text{ eV}$, cioè 1 EeV) lo spettro dei raggi cosmici diventa meno ripido, determinando un altro cambiamento di pendenza, chiamato **caviglia**. Infine, alle energie più alte nella figura, si vede una drastica riduzione del flusso.

Un limite superiore all'energia dei raggi cosmici da sorgenti lontane è stato calcolato nel 1966 da Greisen, Kuzmin e Zatsepin, ed è chiamato oggi cutoff GZK [3, 4]. I protoni con energie superiori alla soglia di circa 10^{20} eV subiscono un'interazione con i fotoni del fondo cosmico di microonde (CMB) e degradano la loro energia producendo pioni, in particolare attraverso le reazioni



Questa degradazione continua fino a quando l'energia dei nucleoni scende sotto la soglia di produzione della Δ (1232 MeV). A causa del percorso medio associato all'interazione, i raggi cosmici

extragalattici provenienti da distanze maggiori di $\sim 50 \text{ Mpc}$ dalla Terra e con energie maggiori di circa 10^{20} eV sono fortemente soppressi, e non ci sono sorgenti conosciute a distanze minori che possano produrli. Un effetto simile (fotodisintegrazione nucleare) limita il cammino libero medio dei nuclei più pesanti.

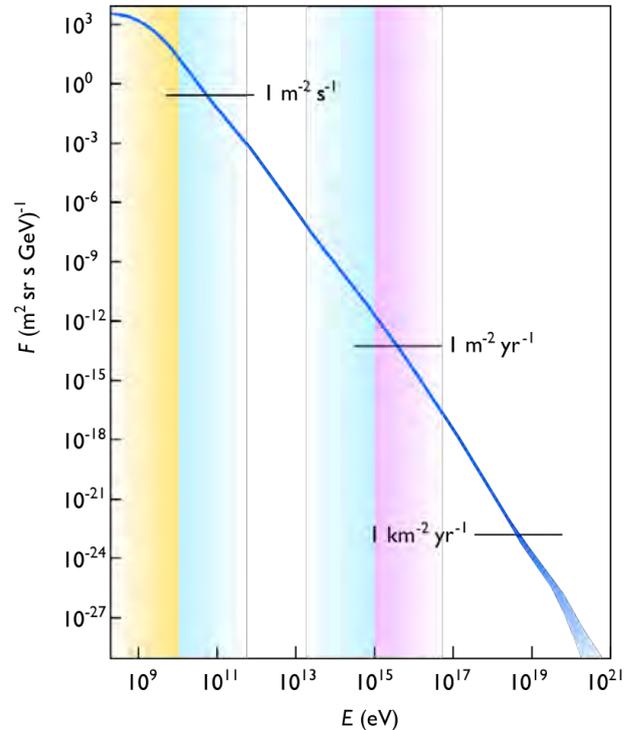


Figura 1: Spettro energetico (numero di particelle incidenti per unità di energia, per secondo, per unità di area, e per unità di angolo solido) dei raggi cosmici primari. La banda verticale a sinistra indica la regione energetica in cui si suppone che l'emissione dal Sole sia dominante; la banda centrale la regione in cui la maggior parte dell'emissione è presumibilmente di origine galattica; la banda a destra la regione di origine extragalattica. Wikimedia Commons.

La composizione dei raggi cosmici, come prevedibile, varia molto con l'energia. Il numero di neutrini ad alta energia è stimato essere paragonabile a quello dei fotoni ad alta energia, ma è molto più alto ad energie più piccole, fino alle energie del MeV, a causa dei processi nucleari che avvengono nel Sole, che comportano una grande produzione di neutrini.

I messaggeri cosmici neutri e stabili (raggi gamma, neutrini) sono molto preziosi poiché non sono deflessi dai campi magnetici extragalattici (dell'ordine di $10^{-9} - 10^{-15} \text{ G}$) o galattici (dell'ordine di 10^{-6} G) e puntano direttamente alle

loro sorgenti, consentendone la localizzazione. Infatti la curvatura indotta dai campi magnetici

$$\frac{R_L}{1\text{kpc}} \simeq \frac{E/1\text{EeV}}{B/1\mu\text{G}} \quad (1)$$

è tale che è impossibile localizzare sorgenti vicino al Centro Galattico, a circa 9 kpc (28mila anni-luce) da noi, con protoni meno energetici di ~ 10 EeV, un'energia molto vicina al cutoff GZK. Abbiamo rivelato invece un grande flusso di raggi gamma provenienti da diversi siti di produzione cosmica. Infine, l'esistenza di neutrini astrofisici è stata provata solo nel 2013 [5].

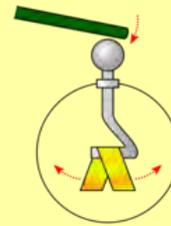
I raggi cosmici che colpiscono l'atmosfera ad energie altissime (ad esempio fotoni sopra i 100 GeV e nuclei sopra circa 1 TeV) possono produrre particelle secondarie che raggiungono la superficie terrestre attraverso il fenomeno degli sciami moltiplicativi.

Circa una volta al minuto, una singola particella subatomica entra nell'atmosfera terrestre con un'energia maggiore di 10 J ($1\text{ J} \sim 6\text{ EeV}$): da qualche parte nell'Universo esistono acceleratori che impartiscono ai singoli protoni energie milioni di volte più grandi delle energie raggiunte dal Collisore LHC al CERN. Come può accadere? Pensiamo che il motore ultimo dell'accelerazione dei raggi cosmici sia la gravità. In collassi gravitazionali giganteschi, come quelli che avvengono nelle supernove e nell'accrescimento di buchi neri supermassicci (equivalenti a milioni o miliardi di masse solari) a spese della materia circostante nei centri delle galassie (i cosiddetti nuclei galattici attivi, AGN), parte dell'energia potenziale gravitazionale si trasforma in energia cinetica delle particelle. La ragione per cui la massima energia raggiunta dagli acceleratori costruiti dall'uomo con le tecnologie di accelerazione attualmente conosciute non può competere con gli acceleratori cosmici è semplice. Il modo più efficiente per accelerare le particelle cariche richiede il loro confinamento entro un raggio R da un campo magnetico B , e l'energia finale è proporzionale al prodotto RZB , dove Z è la carica della particella in unità di e :

$$\begin{aligned} \frac{E}{1\text{PeV}} &\simeq \frac{ZB}{1\mu\text{G}} \times \frac{R}{1\text{pc}} \simeq 5 \frac{ZB}{1\text{G}} \times \frac{R}{1\text{AU}} \\ &\simeq 0.0003 \frac{ZB}{1\text{T}} \times \frac{R}{1\text{km}}. \end{aligned} \quad (2)$$

Elettroscopio

L'elettroscopio è costituito da un pomello conduttore collegato a due sottili lamine metalliche chiamate foglioline (solitamente d'oro) che sono racchiuse in un recipiente di vetro per isolarle.



Avvicinando al pomello metallico un corpo caricato elettricamente, ad esempio una bacchetta di plastica strofinata con un panno di lana, si vedranno le due lamine separarsi. La vicinanza del corpo elettricamente carico trasmette le cariche dello stesso segno alle due foglioline che si respingono.

Sulla Terra, è difficile immaginare raggi di confinamento più grandi di qualche km, e campi magnetici più forti di qualche T. Questa combinazione può fornire energie di qualche TeV, come quelle dell'LHC. Esistono acceleratori astrofisici con raggi molto più grandi, come i resti di supernova (anni luce) e i nuclei galattici attivi (decine di migliaia di anni luce). Naturalmente gli acceleratori creati dall'uomo hanno importanti vantaggi, come la luminosità e la conoscenza delle condizioni iniziali.

Breve storia della ricerca sui raggi cosmici

La storia di come abbiamo imparato tutto questo è affascinante. Nel 1785, Coulomb scoprì che gli elettroscopi possono scaricarsi spontaneamente, e non semplicemente a causa di un isolamento difettoso. Nel 1879 il britannico Crookes osservò che la velocità di scarica diminuiva quando la pressione dell'aria all'interno degli elettroscopi veniva ridotta: la scarica era quindi probabilmente dovuta alla ionizzazione dell'aria. Ma qual è la causa della ionizzazione atmosferica? La radioattività fu osservata nel 1896 da Becquerel, e Marie e Pierre Curie scoprirono che alcuni elementi subiscono trasmutazioni spontanee che

generano radioattività. Un elettroscopio carico si scarica velocemente in presenza di materiali radioattivi. Si concluse che la scarica era dovuta all'emissione di particelle cariche, che inducono la formazione di ioni che neutralizzano le cariche delle foglioline. La velocità di scarica degli elettroscopi fu quindi usata per misurare il livello di radioattività.

Durante la prima decade del ventesimo secolo, diversi ricercatori in Europa e nel Nuovo Mondo progredirono nello studio della ionizzazione. Per quanto riguarda l'origine delle radiazioni che la inducono, l'ipotesi più semplice era che fossero legate a materiale radioattivo nel suolo. L'origine terrestre di parte della radioattività era certa, ma non si era sicuri che non ci fosse qualcos'altro.

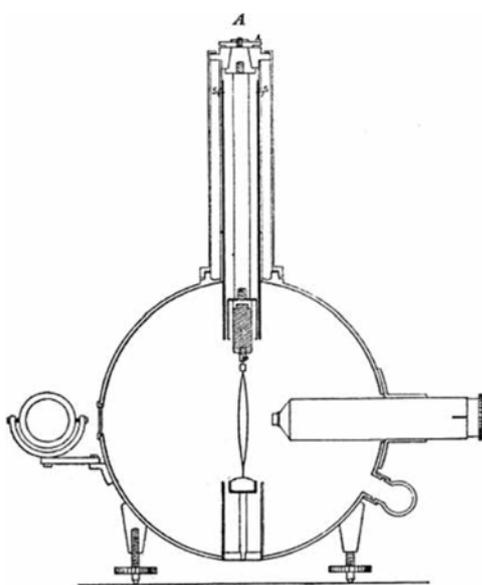


Figura 2: Schema dell'elettroscopio di Wulf (disegnato da Wulf stesso [6]). Il cilindro principale era fatto di zinco, e il volume totale era di circa un litro. La distanza tra i due fili di vetro al silicio (al centro) era misurata usando il microscopio a destra. I fili erano illuminati usando lo specchio a sinistra. Secondo Wulf, la sensibilità dello strumento era di 1 V, come misurato dalla diminuzione della distanza tra i fili.)

Padre Theodor Wulf, uno scienziato tedesco e sacerdote gesuita che insegnava in Olanda dopo alcune esperienze al Collegio Romano, misurò la variazione della ionizzazione con l'altezza per verificare se l'origine della radioattività fosse, in parte, extraterrestre. Nel 1909, utilizzando un elettroscopio trasportabile (Fig. 2) in cui le due foglie erano state sostituite da fili di vetro al silicio rivestiti di metallo, misurò il tasso di ioniz-

zazione in cima alla Torre Eiffel, a circa 300 m di altezza. Nell'ipotesi che la maggior parte della radiazione fosse di origine terrestre, si aspettava che il tasso di ionizzazione fosse significativamente inferiore rispetto al valore al suolo. La diminuzione misurata era troppo piccola per confermare l'ipotesi. Tuttavia, il risultato era afflitto da due problemi: la torre Eiffel era una fonte non trascurabile di radioattività, e l'interpretazione dei risultati era stata fatta nell'ipotesi che i raggi cosmici fossero raggi gamma, e quindi il valore assunto per la lunghezza di attenuazione era basso rispetto a quello che oggi sappiamo essere tipico della radiazione cosmica [6].



Figura 3: Pacini al lavoro nel 1910. Per gentile concessione della famiglia Pacini (Wikimedia Commons).

La conclusione che la ionizzazione atmosferica fosse principalmente dovuta alla radioattività della crosta terrestre fu messa in discussione dal geofisico Domenico Pacini (Fig. 3). Pacini sviluppò una tecnica per misure subacquee e condusse esperimenti nel mare del Golfo di Genova (usando il cacciatorpediniere Fulmine della Marina Militare Italiana presso l'Accademia Navale di Livorno) e nel lago di Bracciano [7]. Trovò una diminuzione significativa (circa il 20%, con una significatività pari a 4.3 deviazioni standard) della velocità di scarica spontanea di elettroscopi posti a tre metri sott'acqua. Scrisse:

"Le osservazioni effettuate nel mare nel 1910 mi conducevano a concludere che una parte non trascurabile della radiazione penetrante che si riscontra nell'aria avesse origine indipendente dall'azione diretta delle sostanze attive con-

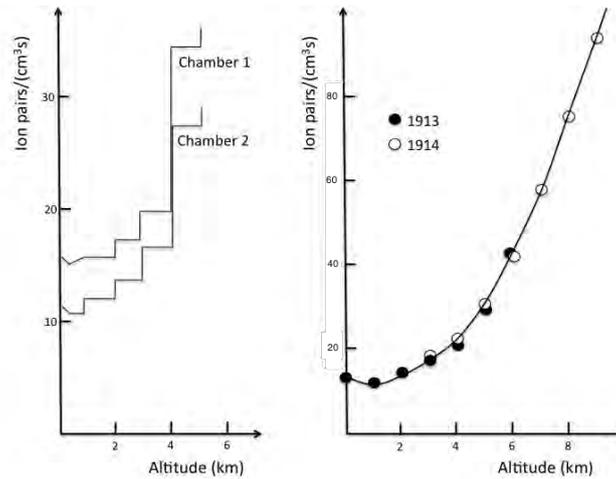


Figura 4: A sinistra: Hess durante il volo in mongolfiera nell'agosto 1912 (Wikimedia, pubblico dominio). A destra: La ionizzazione misurata nel volo ad alta quota di Hess del 1912 e nel volo di Kollhörster nel 1914 (media dei suoi due rivelatori) [1].

tenute negli strati superiori della crosta terrestre [...] [Per provare questa conclusione] l'apparecchio [...] venne racchiuso in una scatola di rame per poterlo immergere in seno alle acque. [...] Si fecero delle osservazioni coll'apparecchio alla superficie, e coll'apparecchio immerso nelle acque, a 3 m di profondità."

Pacini concluse che la diminuzione era dovuta a radiazione non proveniente dalla crosta terrestre.

Dopo le osservazioni di Wulf e i risultati di Pacini, la necessità di esperimenti con palloni aerostatici (ampiamente utilizzati per studi sull'elettricità atmosferica dal 1885, e prima ancora da Gay-Lussac per testare la sua legge dei gas) divenne chiara.

Il primo pallone ad alta quota con lo scopo di studiare la radiazione penetrante fu fatto volare in Svizzera nel 1909 da Albert Gockel, professore all'Università di Friburgo, che salì fino a 4500 m s.l.m., ma fece misure solo fino a 3000 m (lo strumento poi si ruppe). Trovò che [8] il tasso di ionizzazione non diminuiva con l'altitudine come ci si aspettava nell'ipotesi di origine terrestre, e concluse che

"una parte non trascurabile della radiazione penetrante è indipendente dall'azione diretta delle sostanze radioattive negli strati più alti della Terra".

Le misure sulla scarica spontanea avevano dimostrato che la radiazione di fondo era presente anche in ambienti isolati e poteva penetrare schermi metallici. Era difficile spiegarla in termini di radiazione α (nuclei di elio) o β (elettroni); si suppose quindi che fosse una radiazione γ , cioè fatta di fotoni, che era la più penetrante tra i tre tipi di radiazione conosciuti all'epoca (il potere penetrante delle particelle cariche relativistiche non era ancora noto).

L'esperimento decisivo fu eseguito nel 1912 dall'austriaco Victor Hess (Fig. 4, a sinistra), dopo un'accurata preparazione e calibrazione degli strumenti. Hess volò sette volte con tre elettroscopi, schermati da metalli di diversa spessore per distinguere le radiazioni α , β e γ . Nell'ultimo volo, il 7 agosto, raggiunse un'altezza di 5200 m [9]. La ionizzazione, dopo essere passata attraverso un minimo, aumentò considerevolmente con l'altezza (Fig. 4, a destra).

- "(i) Immediatamente sopra il suolo la radiazione totale diminuisce un po'.
- (ii) Ad altitudini da 1000 a 2000 m si verifica di nuovo una crescita notevole della radiazione penetrante.
- (iii) L'aumento raggiunge, ad altitudini da 3000 a 4000 m, il 50% della radiazione totale osservata al suolo.
- (iv) A 4000 a 5200 m la radiazione è più forte [più del 100%] che al suolo".

Hess concluse che l'aumento della ionizzazione con l'altezza è dovuto alla radiazione proveniente dall'alto, e che questa radiazione è di origine extra-terrestre. Escluse il Sole come fonte diretta di questa ipotetica radiazione penetrante a causa dell'assenza di variazioni giorno-notte.

Questi risultati furono poi confermati dal suo allievo Kolhörster in un certo numero di voli fino a 9200 m: fu misurata una ionizzazione fino a dieci volte più grande di quella a livello del mare (Fig. 4 a destra). Kolhörster misurò il coefficiente di assorbimento della radiazione, e trovò che era otto volte più piccolo del coefficiente di assorbimento dei raggi gamma; tuttavia non indagò ulteriormente la discrepanza. L'ultimo volo di Kolhörster fu eseguito il 28 giugno del 1914, giorno dell'assassinio dell'arciduca Francesco Ferdinando, erede dell'impero austro-ungarico, a Sarajevo – un giorno che ha cambiato la storia.

Durante la guerra 1914-1918 e gli anni che seguirono, furono eseguite pochissime indagini sulla radiazione penetrante; il centro della ricerca si spostò fino al 1930 negli Stati Uniti, e molte informazioni sui risultati in Europa andarono perse. L'idea dei raggi cosmici, nonostante le impressionanti prove sperimentali, non fu immediatamente accettata.

Nel 1926 Millikan eseguì misure di assorbimento della radiazione a diverse profondità in laghi ad alta quota. Egli concluse, erroneamente, che la radiazione era costituita da raggi γ ad alta energia "[che viaggiano] attraverso lo spazio allo stesso modo in tutte le direzioni" e li chiamò **raggi cosmici**. Millikan aveva azzardato l'ipotesi che questi raggi fossero prodotti quando protoni ed elettroni formavano nuclei di elio nello spazio interstellare, e che fossero "grida di atomi neonati".

Un esperimento chiave sulla natura dei raggi cosmici fu la misurazione della variazione di intensità con la latitudine geomagnetica. Durante due viaggi in nave tra Java e Genova nel 1927 e 1928, il fisico olandese Clay trovò che la ionizzazione aumentava con la latitudine; questo dimostrò che i raggi cosmici venivano deviati dal campo geomagnetico: quindi erano soprattutto particelle cariche.

Nel 1928 fu introdotto il tubo contatore Geiger-Müller - secondo Giuseppe Occhialini, uno dei pionieri dell'esplorazione della fisica fonda-

mentale con i raggi cosmici, era come il revolver Colt nel Far West: uno strumento economico utilizzabile da tutti nel proprio cammino attraverso una dura frontiera. Alla fine degli anni '20, i tedeschi Bothe (premio Nobel per la fisica nel 1954 "per il metodo della coincidenza e le sue scoperte fatte con esso") e Kolhörster introdussero la tecnica della coincidenza per studiare i raggi cosmici con il contatore Geiger, permettendo così la misura della direzione di arrivo. Un circuito di coincidenza attiva l'acquisizione di dati solo quando i segnali da rivelatori predefiniti vengono ricevuti entro una determinata finestra temporale.

Nel 1933, tre esperimenti indipendenti di Alvarez e Compton [10], Johnson [11], Rossi [12] scoprirono che vicino all'equatore c'erano più raggi cosmici provenienti da ovest che da est. Questo effetto, dovuto all'interazione con il campo geomagnetico, ha dimostrato che i raggi cosmici sono per lo più carichi positivamente, quindi molto probabilmente protoni.

Con lo sviluppo della fisica dei raggi cosmici, gli scienziati sapevano che sorgenti astrofisiche fornivano particelle di alta energia che entravano nell'atmosfera. L'ovvio passo successivo era quello di indagare la natura di tali particelle, e di usarle per sondare la materia in dettaglio, proprio come nell'esperimento di Rutherford. La fisica delle particelle iniziò così con i raggi cosmici, e molte delle scoperte fondamentali furono fatte grazie ai raggi cosmici. In parallelo, la comprensione teorica della fisica progrediva rapidamente: alla fine degli anni 1920, gli scienziati cercarono di mettere insieme la relatività e la meccanica quantistica, e le scoperte successive a questi tentativi cambiarono completamente la nostra visione della natura. La camera a nebbia (una scatola che contiene un vapore soprassaturo in modo tale che piccole goccioline si formino intorno alla traiettoria di una particella carica che vi passa attraverso) e le emulsioni nucleari (lastre fotografiche che registrano le tracce del passaggio di particelle cariche) furono i primi strumenti a rendere possibili queste scoperte.

Nel 1933 Anderson, uno studente di Millikan, scoprì nei raggi cosmici l'antimateria sotto forma di una particella positiva di massa uguale alla massa dell'elettrone, poi chiamata positrone [13]. Una previsione dell'equazione di Dirac fu confermata; questo fu un risultato chiave per

la fisica dei raggi cosmici. Anderson condivise con Hess il premio Nobel per la fisica nel 1936; furono nominati da Compton, con la seguente motivazione:

"è arrivato il momento [...] in cui possiamo dire che i cosiddetti raggi cosmici hanno sicuramente la loro origine a distanze così remote dalla Terra che possono essere propriamente chiamati cosmici e che l'uso di questi raggi ha ormai portato a risultati di tale importanza che possono essere considerati una scoperta di prima grandezza. [...] Hess è stato il primo a stabilire l'aumento della ionizzazione osservata negli elettroscopi con l'aumentare dell'altitudine; e certamente il primo ad attribuire con sicurezza questo aumento di ionizzazione alla radiazione proveniente dall'esterno della Terra".

Perché un riconoscimento così tardivo alla scoperta dei raggi cosmici? Compton scrive:

"Prima che fosse opportuno assegnare il premio Nobel per la scoperta di questi raggi, era necessario attendere prove più certe riguardo alle loro caratteristiche uniche e alla loro importanza in vari campi della fisica" [14].

Dopo la fondamentale scoperta dell'antimateria, nuovi risultati sperimentali nella fisica delle particelle elementari con i raggi cosmici furono guidati e accompagnati dal miglioramento degli strumenti di rivelazione, in particolare dal miglioramento delle camere a nebbia e dei circuiti elettronici che utilizzavano tubi Geiger. Nel 1934 Bruno Rossi, che aveva migliorato la tecnica delle coincidenze, riportò l'osservazione di segnali quasi simultanei da coppie di contatori Geiger a grandi distanze durante una prova della sua attrezzatura. Scrisse:

"[Sembra che] ogni tanto l'apparecchio di registrazione sia colpito da sciame di particelle molto estesi, che provocano coincidenze tra i contatori, anche posti a grande distanza l'uno dall'altro" [15].

Nel 1937 Pierre Auger, probabilmente all'oscuro dell'articolo di Rossi, fece un'osservazione simile e studiò il fenomeno in dettaglio. Concluse

che gli sciame estesi hanno origine quando i raggi cosmici primari ad alta energia interagiscono con i nuclei nell'alta atmosfera, portando ad una serie di interazioni che alla fine producono uno sciame atmosferico di particelle che raggiungono il suolo. Questa era la spiegazione della scarica spontanea di elettroscopi dovuta ai raggi cosmici [16].

La fisica delle particelle elementari è stata per diversi anni essenzialmente un prodotto della ricerca sui raggi cosmici. Molte nuove particelle furono scoperte negli anni successivi nei raggi cosmici: muoni, mesoni, particelle strane. Con gli anni 1950, tuttavia, gli acceleratori cominciarono a prendere il dominio, e nella Conferenza Internazionale sui Raggi Cosmici a Bagnères de Bigorre del 1953, Leprince-Ringuet disse nelle sue osservazioni conclusive:

"In futuro dovremo usare gli acceleratori di particelle [...] anche se [...] abbiamo l'esclusiva di alcuni fenomeni [...] per i quali le energie sono molto più grandi" [17].

Anche dopo il 1950, coerentemente con la previsione di Leprince, sebbene il centro dell'attenzione della fisica delle particelle si sia spostato sulla fisica degli acceleratori (almeno fino al 2012), molti risultati di prima grandezza nella fisica fondamentale sono dovuti ai raggi cosmici, in particolare:

- La scoperta del quark charm. La produzione associata di particelle charmate è stata osservata per la prima volta in Giappone nel 1971 negli studi sulle emulsioni di raggi cosmici [18], tre anni prima della scoperta del mesone J/ψ negli acceleratori (1974).
- La scoperta che i neutrini hanno una massa diversa da zero. Questa è finora l'unica prova che dimostra che deve esistere una fisica oltre il Modello Standard: una particella (il neutrino destrorso) è sterile nel modello, essendo la sua interazione puramente gravitazionale (ossia la sua esistenza fisica è legata a un tipo di interazione non compresa nel modello).

Come e dove vengono prodotti i raggi cosmici?

Nel 1933, lo svizzero Zwicky e il tedesco Baade avanzarono una congettura rivoluzionaria: le stelle massicce terminano la loro vita in collassi seguiti da esplosioni; tali esplosioni producono raggi cosmici e si lasciano dietro una stella fatta di neutroni densamente impacchettati. Ma come può un resto di supernova (o qualsiasi altro residuo di un collasso gravitazionale) accelerare le particelle? Fu necessario aspettare fino al 1949 quando Enrico Fermi concepì un modello che spiegava questa congettura.

Fermi propose un meccanismo in cui le particelle possono essere accelerate in collisioni stocastiche rimbalzando avanti e indietro tra le pareti dei plasmi associati alle onde d'urto che partono dal resto di un collasso gravitazionale - un collasso stellare, ma anche, come sappiamo oggi, l'intorno di un buco nero che si accresce nel centro di una galassia. Il modello di Fermi spiega approssimativamente la dipendenza dalla legge di potenza osservata nel flusso dei raggi cosmici.

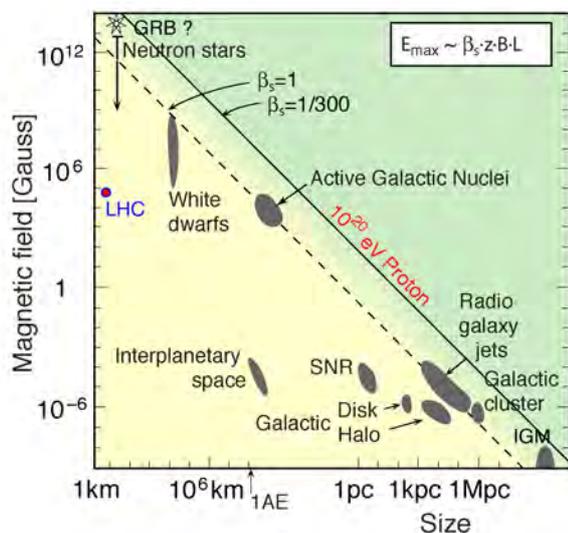


Figura 5: Plot di Hillas: sull'asse delle ordinate il campo magnetico, sull'asse delle ascisse la dimensione delle potenziali sorgenti di raggi cosmici.

Gli ingredienti principali del meccanismo di Fermi sono un oggetto compatto e le onde d'urto che si espandono da esso, ma le particelle non devono scappare subito dalla regione di accelerazione: ci vogliono un raggio e un campo ma-

gnético abbastanza grandi. Quali sono i possibili oggetti cosmici in cui queste condizioni possono essere realizzate? L'Eq. (2) implica la cosiddetta relazione di Hillas, che è illustrata nella Fig. 5. Le energie nel plot di Hillas sono le energie massime raggiungibili: l'efficienza del processo di accelerazione sono incorporate nel termine $\beta_s < 1$, che esprime l'efficienza dell'acceleratore descritto dall'Eq. (2). Si può vedere che:

- Le sorgenti capaci di accelerare particelle nella Galassia sono prevalentemente resti di supernova, detti brevemente SNR. In questo articolo intendiamo con questo termine i punti finali dell'evoluzione di grandi stelle: ciò che resta di queste stelle (oggetti compatti derivanti dal collasso e onde d'urto del materiale eiettato) dopo che hanno esaurito il loro combustibile e sono esplose. Le onde d'urto prodotte dalle esplosioni di supernova, che sopravvivono nelle SNR fino a qualche migliaio di anni dopo l'evento cataclismatico, sono capaci di accelerare particelle cariche ad energie fino al ginocchio. Abbiamo potuto recentemente misurare che alcune giovani (500 anni o meno) SNR si espandono a velocità $> c/100$ (Fig. 6 a sinistra), abbastanza per accelerare particelle ad energie relativistiche.
- Oltre il ginocchio, le possibili sorgenti possono essere AGN o collassi di grandi supernove o di sistemi binari, che hanno frequentemente una corrispondenza con l'emissione di un transiente veloce di raggi X e gamma, il cosiddetto lampo di raggi gamma o GRB (*gamma-ray burst*). Tuttavia, se i GRB fossero le fonti dominanti di raggi cosmici di altissima energia ci si aspetterebbe una corrispondente emissione di neutrini dovuta ai decadimenti dei pioni carichi prodotti dall'interazione degli adroni con il mezzo circostante, fenomeno che non si è osservato. Gli AGN devono quindi essere la fonte dominante di raggi cosmici di altissima energia.

Come localizzare gli acceleratori cosmici di particelle? L'Eq. (1) mostra che è molto difficile puntare le sorgenti usando particelle cariche: si ha bisogno di particelle di energia estremamente



Figura 6: A sinistra: il resto della supernova di Tycho, una delle sette supernove viste a occhio nudo nella storia. Apparve nel 1572 e fu indipendentemente osservata e studiata da molti scienziati, in particolare da Tycho Brahe. È relativamente giovane e si sta ancora espandendo ad una velocità di 3000 km/s, come misurato dall'osservazione diretta. A destra: L'AGN Centaurus A: un buco nero supermassiccio che si accresce ingoiando le stelle e le nubi molecolari vicine, ed emette getti di raggi gamma e particelle cariche (NASA).

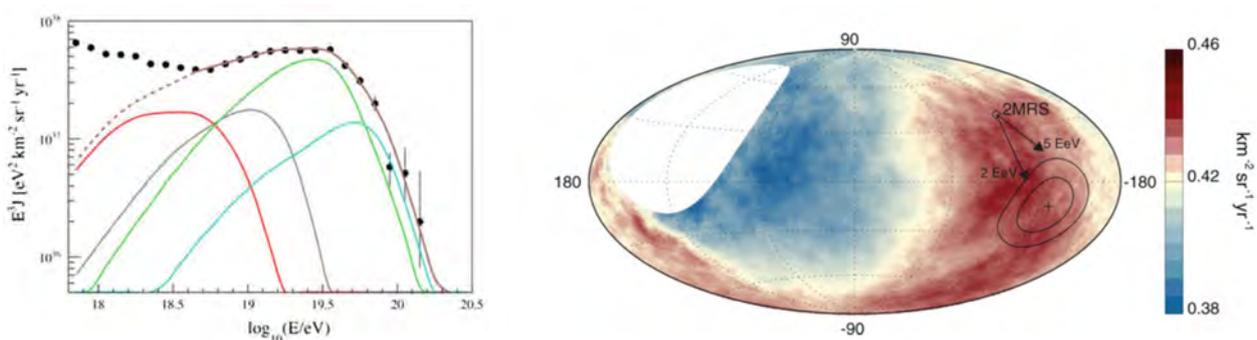


Figura 7: A sinistra: spettro ad altissima energia dei raggi cosmici misurati da Auger (pallini chiusi); lo spettro è stato moltiplicato per E^3 . Sovrapposto un fit dei dati ottenuto sommando diverse componenti: da sinistra a destra protoni, nuclei di He, una componente indistinta di nuclei di C, N, O, e nuclei di Fe. A destra: Mappa del cielo in coordinate galattiche che mostra il rapporto tra il numero di eventi osservati e quelli attesi per una distribuzione isotropa delle direzioni di arrivo, per $E > 32 \text{ EeV}$.

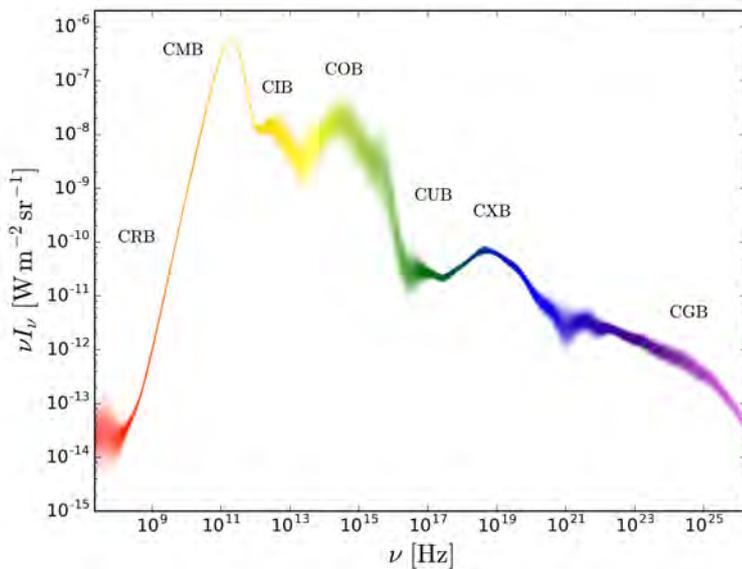


Figura 8: Distribuzione energetica della radiazione diffusa extragalattica di fondo [19]. La sigla CRB indica la radiazione di fondo (background) nella regione delle onde radio; CMB indica il cosmic microwave background, la radiazione fossile del Big Bang; CIB indica il background infrarosso, proveniente dal rescattering della luce visibile delle stelle sulle nuvole di plasma che popolano l'Universo; COB indica la radiazione ottica di fondo, proveniente principalmente dalle stelle; CUB indica la radiazione di fondo ultravioletta; CXB indica la radiazione di fondo nella regione dei raggi X; CGB indica il gamma-ray background.

alta, il che significa rivelatori molto grandi dato il rapido calo del flusso con l'energia.

L'Osservatorio Pierre Auger in Argentina è il più grande rivelatore del mondo, circa 3000 km² di superficie (1% della superficie totale dell'Italia), e rivela le particelle secondarie in sciame prodotti dalla interazione dei raggi cosmici primari con i nuclei d'aria nell'atmosfera (questo tipo di rivelatori sono chiamati rivelatori Extensive Air Shower, o EAS). Auger è un rivelatore ibrido, che impiega 1660 serbatoi d'acqua, distanziati di 1.5 km l'uno dall'altro, che rivelano le particelle cariche degli sciami attraverso la luce Čerenkov prodotta nella loro interazione con l'acqua stessa, e 4 telescopi che osservano lo sviluppo di sciami in aria mediante la luce ultravioletta di fluorescenza emessa nell'atmosfera. Il Telescope Array nello Utah funziona secondo lo stesso principio; i rivelatori Čerenkov ad acqua sono sostituiti da scintillatori e la superficie totale è circa 1/4 di quella di Auger.

L'Osservatorio Auger ha trovato due risultati particolarmente importanti: l'esistenza del *cut-off* GZK, con un probabile arricchimento della composizione in termini di nuclei più pesanti alle energie più alte (Fig. 7, a sinistra) e un'anisotropia dipolare che indica una correlazione posizionale dei raggi cosmici di più alta energia con AGN (Fig. 7 a destra). Anche se la correlazione con il campione di AGN mostra una significatività maggiore di 5 deviazioni standard, le correlazioni individuali non sono significative.

La più probabile (più di 3 deviazioni standard di significatività) è con l'AGN Centaurus A (Fig. 6 a destra).

La maggior parte delle localizzazioni di sorgenti di raggi cosmici di alta energia sono state possibili grazie ai raggi gamma. Nello spettro di fotoni dell'Universo (vedi Fig. 8) vediamo le tracce di molti sistemi termalizzati o quasi termalizzati: per cominciare, il CMB, che ha la più alta densità di fotoni (circa 400 per cm³). Salendo in energia, osserviamo altri spettri termici: quelli delle stelle, che raccontano la storia dell'evoluzione dell'Universo, e ad energie più alte gli spettri relativi alle regioni di accrescimento dei buchi neri, che corrispondono a temperature fino a milioni di kelvin - alcuni keV. Oltre queste energie si sondano meccanismi non termici: i fotoni prodotti sono il risultato di interazioni di altissima energia tra particelle nucleari. Questo chiarisce l'importanza dell'astrofisica dei raggi X e gamma.

Possiamo dividere in due grandi categorie gli strumenti per i raggi gamma: i rivelatori spaziali e quelli a terra. Queste due tipologie sono complementari. Lo spettro sperimentale dei raggi gamma abbraccia infatti più di 20 decenni (70 ottave) in energia e circa 14 in flusso, diminuendo rapidamente alle alte energie. È quindi chiaro che più grande è l'energia, più grande deve essere l'area efficace, definita come il prodotto dell'area per l'efficienza del rivelatore. A causa del costo della tecnologia spaziale, la superficie dei



Figura 9: A sinistra i due telescopi da 17 metri MAGIC nell'isola canaria di La Palma; a destra, il primo telescopio di grandi dimensioni CTA (23 m), inaugurato nell'ottobre 2018. Fotografia di Koji Noda.

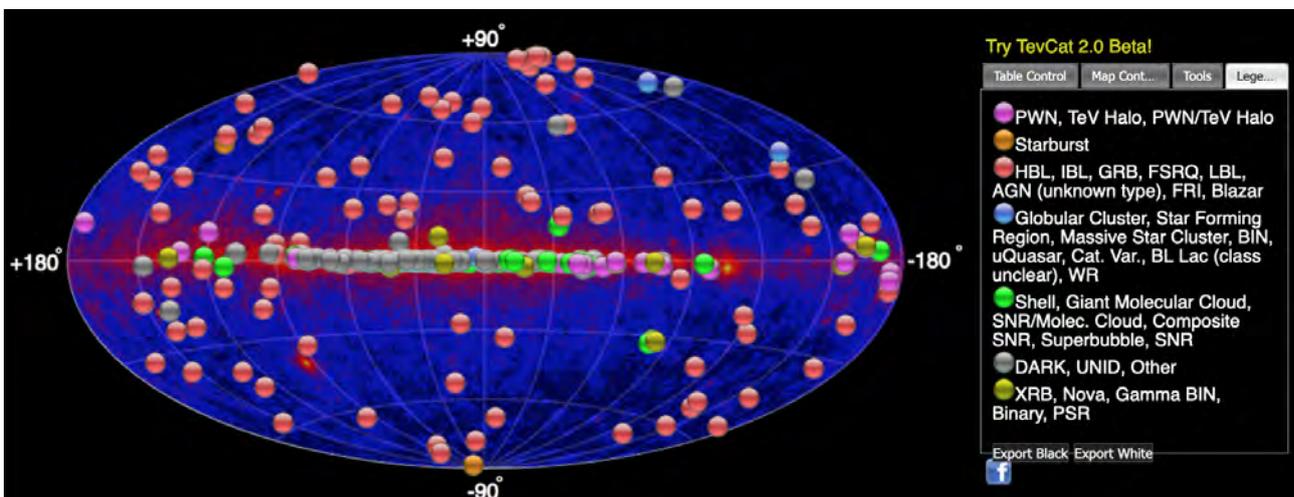


Figura 10: Mappa degli emettitori di fotoni sopra i 100 GeV nell'Universo, in coordinate galattiche (dal catalogo TeVCAT, marzo 2022). Le sorgenti sono indicate come cerchi; i colori rappresentano diversi tipi di emettitori (vedi la legenda). La maggior parte degli emettitori galattici è associata alle SNR, mentre gli emettitori extragalattici sono compatibili con le galassie attive – gli strumenti non hanno la risoluzione necessaria per studiare la morfologia delle galassie al di fuori del gruppo locale.

rivelatori non può comunque superare è circa 1 m^2 . Questo aspetto rende i rivelatori spaziali più adatti a misurare i raggi gamma nell'intervallo di energia dal MeV a qualche GeV. Per passare a energie più alte, sono necessarie grandi aree di rivelazione che possono essere ottenute solo a terra, sfruttando il fatto che, per energie superiori a circa 30 GeV, gli sciame elettromagnetici in aria iniziano a diventare rivelabili (mentre se l'energia è troppo bassa, lo sciame non può svilupparsi adeguatamente). Quando un raggio gamma entra nell'atmosfera, genera una cascata di particelle secondarie: il fotone si converte ad alta quota in coppie e^+e^- e ogni elettrone/positrone ad alta energia irradia raggi gamma secondari

soprattutto attraverso il meccanismo di *bremsstrahlung*; questi si convertono ulteriormente in coppie e^+e^- di energie inferiori, e così via.

Le cascate elettromagnetiche nell'atmosfera possono essere rivelate:

- misurando la radiazione Čerenkov di particelle cariche nell'aria (tecnica Čerenkov). La maggior parte delle particelle cariche secondarie hanno una velocità maggiore di quella della luce nell'aria ed emettono quindi radiazione Čerenkov, che può essere rivelata da telescopi speciali (Fig. 9). L'area effettiva di rivelamento è paragonabile a quella della proiezione della radiazione Čeren-

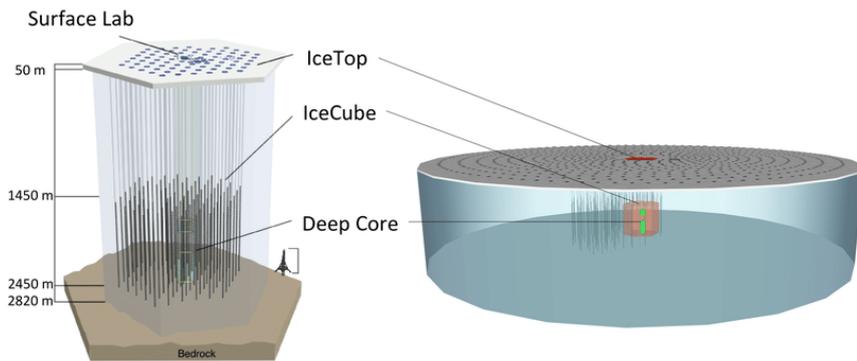


Figura 11: A sinistra: IceCube, uno strumento di un chilometro cubo di volume incorporato nel ghiaccio antartico. La sala di controllo è posta nella base antartica al di sopra della superficie del ghiaccio. In basso l'immagine della torre Eiffel dà un'idea della scala. A destra un'immagine di IceCube confrontato con la prevista estensione IceCube Gen2.

kov dello sciame a terra, cioè qualche decina di chilometri quadrati.

- rivelando direttamente le particelle cariche che raggiungono il suolo (tecnica EAS).

In Fig. 10 mostriamo una mappa degli emettitori di fotoni di altissima energia in coordinate galattiche; si possono identificare sia emettitori galattici (nel piano equatoriale) sia extragalattici. Molti degli emettitori di raggi gamma di altissima energia corrispondono posizionalmente a SNR, confermando così la congettura di Zwicky: la maggior parte degli acceleratori di raggi cosmici nella nostra Galassia sono SNR.

Un meccanismo per generare fotoni ad alta energia è simile a quello che produce i neutrini: ioni ad alta energia (protoni, nuclei di He, ...) accelerati attraverso il meccanismo di Fermi interagiscono con il mezzo circostante (raggi gamma, nubi di idrogeno) e producono adroni; circa un terzo degli adroni sono pioni neutri che decadono in circa 10^{-16} s in coppie di raggi gamma. Diversamente dal caso dei neutrini, tuttavia, meccanismi concorrenti generano fotoni senza la necessità di adroni accelerati, in particolare meccanismi di radiazione e interazioni Compton.

Una trentina di emettitori di raggi γ galattici sono stati associati a emettitori di raggi cosmici carichi: o attraverso l'identificazione di un picco nel flusso corrispondente al decadimento di π^0 da interazioni adroniche degli ioni accelerati con il mezzo circostante, o dall'*imaging* della sorgente, in cui si possono distinguere i raggi gamma irradiati da particelle accelerate nell'acceleratore primario da quelli provenienti da nubi molecolari (e quindi dalle collisioni di raggi cosmici che hanno interagito con i nuclei delle nubi molecolari producendo sciame adronici), o ancora, più

recentemente, rivelando fotoni dell'energia del PeV, per i quali la produzione adronica è quasi sicura (il meccanismo di produzione leptonica diventa inefficiente oltre i 100 GeV; le sorgenti sono dette in tal caso PeVatroni, e sono gli emettitori più energetici della Galassia). Solo dal 2021 è entrato in funzione a pieno regime uno strumento adatto a rivelare fotoni di queste energie: è il rivelatore EAS chiamato LHAASO (Large High Altitude Air Shower Observatory) [23].

LHAASO è un osservatorio costruito nel Sichuan, in Cina; si trova ad un'altitudine di 4400 metri sul livello del mare e copre un'area di circa 145 ettari. Consta di tre piscine di osservazione sotterranee, ciascuna contenente circa 100 000 tonnellate di acqua che viene utilizzata per generare luce Čerenkov; circa 6000 rivelatori di particella posti sulla superficie, e 18 telescopi Čerenkov ad ampio campo visivo.

L'energia dei protoni genitori è circa 20 volte più grande dell'energia dei raggi gamma (lo stesso rapporto vale anche per i neutrini). La localizzazione (molto recente) di una sorgente extragalattica ha richiesto però una nuova evoluzione dell'astrofisica delle alte energie, chiamata astronomia (o astrofisica) multimessaggero.

I raggi cosmici nell'era dell'astrofisica multimessaggero

Nel 1610 Galilei pubblica il *Sidereus Nuncius*, la prima opera scientifica basata sulle osservazioni fatte con il telescopio. In quel libro commenta e interpreta l'osservazione delle montagne della Luna, di centinaia di stelle mai viste prima e

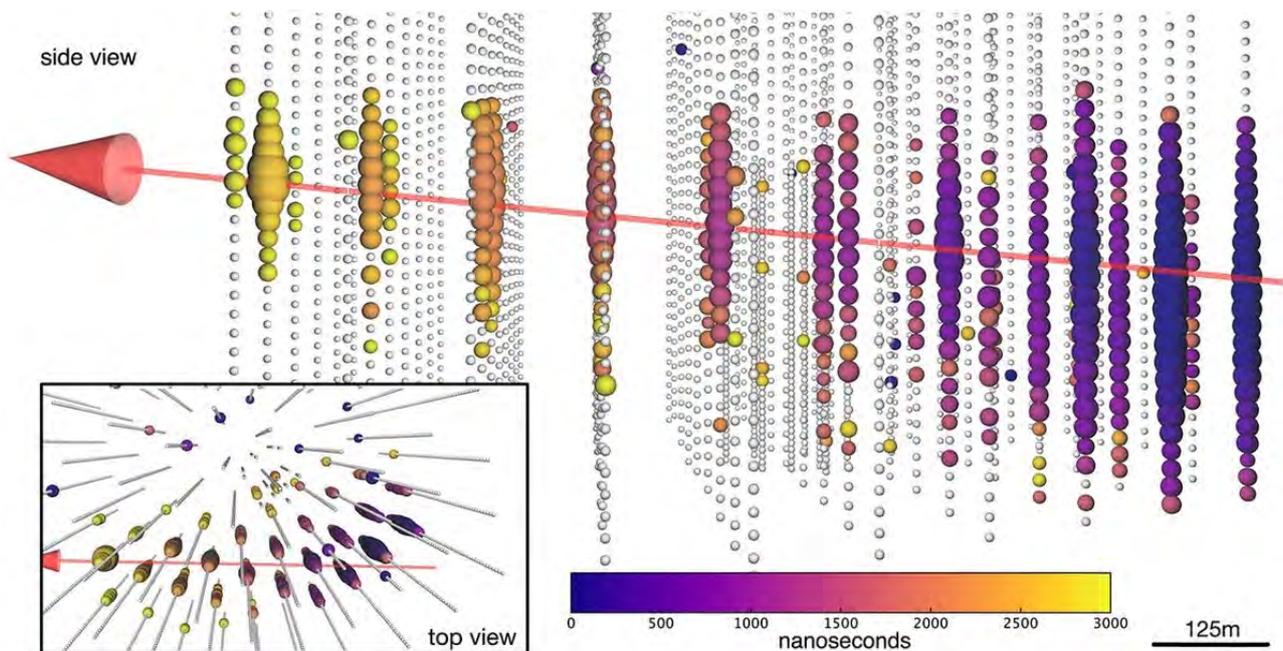


Figura 12: Il segnale del muone originato da un neutrino di 300 TeV proveniente dal blazar TXS 0506 +056 rivelato da IceCube (NSF). La sala di controllo è posta nella base antartica al di sopra della superficie del ghiaccio.

dei satelliti di Giove. Tutto questo era stato possibile grazie alla luce emanata dai corpi celesti: secondo Galilei, la luce è il *nuncius* (messaggero) delle stelle. La storia dei messaggeri cosmici, quindi, inizia con i fotoni, e il fotone è anche oggi il messaggero supremo, poiché è relativamente abbondante e punta alle sorgenti.

Gli esseri umani possono vedere solo una piccola parte dello spettro dei fotoni, corrispondente alle energie tipiche che gli elettroni atomici rilasciano quando si spostano a un livello energetico inferiore; la luce visibile si estende su un'ottava di frequenza. A partire dagli anni 1930, lo spettro di onde che possiamo osservare nell'Universo ha iniziato ad espandersi. Abbiamo potuto vedere nuovi colori invisibili a occhio nudo: le onde radio prodotte dal Sole e dalla galassia, miliardi e milioni di volte meno energetiche della luce visibile; poi le microonde, e infine i raggi X e i raggi gamma, da milioni a miliardi di volte più energetici della luce visibile. La storia dell'astronomia tra il 1930 e il 2015 può essere interpretata come un lungo viaggio alla scoperta dei colori dell'Universo invisibili all'occhio umano. In particolare per i raggi gamma, che sono meno abbondanti della luce visibile, questo ha richiesto lo sviluppo di strumenti innovativi: satelliti come il Fermi LAT che rivelano la conversione dei fotoni in coppie elettrone-positrone, telesco-

pi a terra che rivelano la luce Čerenkov emessa dalle particelle cariche negli sciami elettromagnetici generati dai raggi gamma, come MAGIC, H.E.S.S., Veritas, e recentemente grandi rivelatori a terra come LHAASO. Ora possiamo vedere 70 ottave di frequenza: una tastiera di pianoforte lunga dodici metri.

L'astronomia ha subito un'accelerazione nell'ultimo decennio. Nel febbraio 2016 è stata annunciata la prima rivelazione di un'onda gravitazionale. Le onde gravitazionali, prodotte nell'accelerazione di masse con asimmetria sferica, aprono un modo completamente nuovo di osservare gli eventi più violenti dell'Universo: viaggiano senza ostacoli alla velocità della luce e forniscono informazioni uniche sulle collisioni cataclismiche [20].

Nell'ottobre 2017, un altro annuncio rivoluzionario: per la prima volta sono state rivelate onde gravitazionali insieme a raggi gamma nella fusione di due stelle di neutroni. Questo processo può produrre elementi più pesanti del ferro ed è quindi centrale per l'evoluzione della vita come la conosciamo. Il segnale copre gran parte dello spettro elettromagnetico, dai raggi gamma ai raggi X, alla luce visibile e all'infrarosso, con un velocissimo gamma-ray burst. L'osservazione simultanea dell'onda gravitazionale GW170817 da parte della collaborazione LIGO/Virgo ha con-

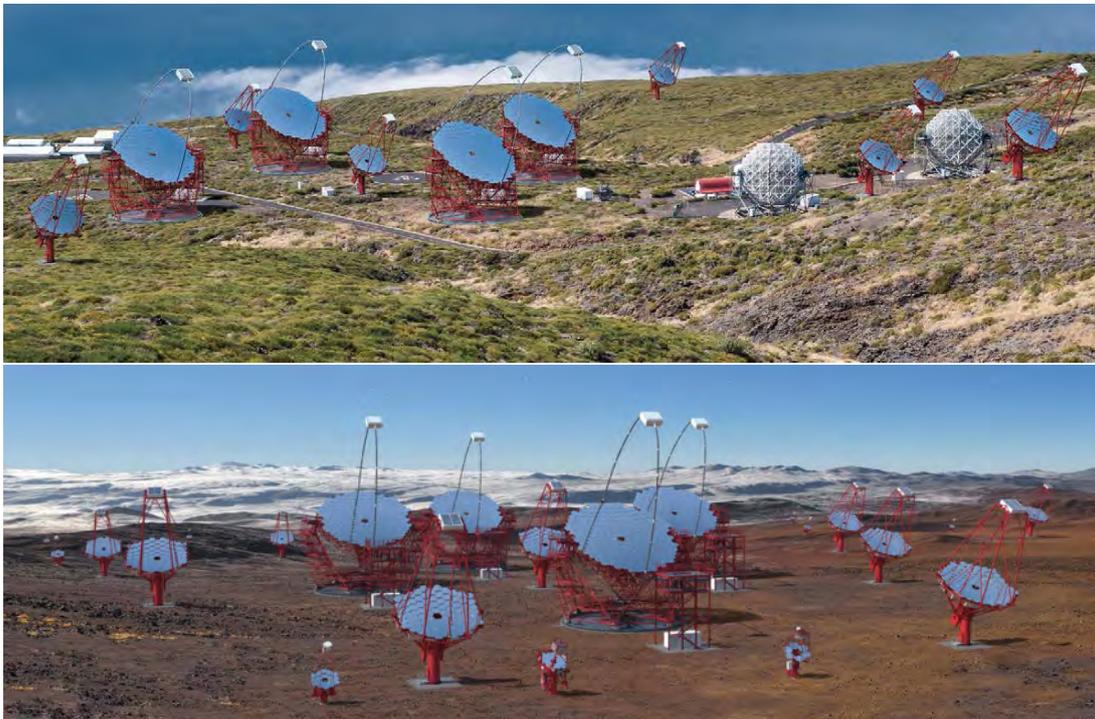


Figura 13: Rendering dell'array multi-telescopio CTA, in costruzione: sito settentrionale a La Palma (in alto) e sito meridionale a Paranal (in basso). Fonte: CTA.

giunto i modelli di collasso stellare dalla fisica teorica e le osservazioni del mondo reale [21].

Luglio 2018: un altro *big bang* nella scienza. Le collaborazioni IceCube (Fig. 12), Fermi e MAGIC (Fig. 9) hanno annunciato la rivelazione simultanea di un segnale di raggi gamma e di un neutrino dal blazar TXS 0506 +056, un AGN che si accresce a spese della massa circostante, con getti che puntano verso la Terra. Ancora una volta, abbiamo potuto risolvere un mistero: il confronto delle energie dei neutrini e dei raggi gamma ha mostrato che, nelle vicinanze del buco nero supermassiccio, la materia (protoni) è accelerata a energie decine di migliaia di volte superiori a quelle di LHC, e ha svelato il meccanismo di produzione adronica di raggi gamma e neutrini: collisioni subnucleari tra protoni e un fondo di fotoni ultravioletti. Questo processo è molto importante poiché indica che abbiamo localizzato per la prima volta un acceleratore di protoni oltre il ginocchio, a una quarantina di PeV [22].

Le onde gravitazionali e i neutrini hanno aperto il campo dell'astrofisica multi-messaggero, integrando ulteriormente la fisica delle particelle e l'astrofisica. Oggi possiamo iniziare a rispon-

dere ad alcune domande fondamentali che sembravano essere fuori dalla nostra portata. Dopo aver costruito strumenti capaci di osservare nuovi colori, stiamo sviluppando nuovi sensi e cominciamo a conoscerli. Come il tatto, l'olfatto, l'udito e il gusto ci danno informazioni sulla realtà che ci circonda, completando ciò che appare attraverso la vista, ora cominciamo a raccogliere e analizzare nuove informazioni da regioni remote dell'Universo trasmesse non dalla luce, ma da diversi messaggeri.

Cosa abbiamo imparato nei primi anni di questa nuova astronomia? Abbiamo spiegato il meccanismo che genera *burst* di raggi gamma brevi, della durata di meno di due secondi (coalescenza di stelle di neutroni) e lunghi (collasso di supernove di grande massa), fino a pochi anni fa un *puzzle* astrofisico. Abbiamo rivelato una galassia che emette simultaneamente neutrini e raggi gamma, scoprendo al suo centro un acceleratore da decine di milioni di GeV. Abbiamo localizzato una trentina di acceleratori di alta energia nella nostra Galassia. Abbiamo visto come si creano gli atomi più pesanti del ferro, e questo è importante per capire la vita. Abbiamo scoperto che l'Universo è sorprendentemente pieno

di piccoli buchi neri di poche decine di masse solari, e questo può avere una conseguenza sulla nostra comprensione del costituente dominante e ancora sconosciuto dell'Universo: la materia oscura.

Il futuro

Cosa prevediamo di fare e speriamo di capire nei prossimi 15 anni? Nuovi satelliti sensibili ai fotoni nella regione energetica tra MeV e GeV (ASTROGAM) potrebbero esplorare l'ancora sconosciuta regione del MeV, la regione dell'astrofisica nucleare. Nuovi strumenti sulla Terra sensibili ai fotoni nella regione energetica da centinaia di GeV a circa 100 TeV (come il telescopio CTA, Fig. 13, un ordine di grandezza più sensibile degli attuali strumenti per i raggi gamma) e oltre (i rivelatori a grande campo di vista LHAASO all'emisfero nord e in futuro il suo analogo SWGO all'emisfero sud) apriranno la strada alla comprensione delle più alte energie di raggi gamma nell'Universo e probabilmente porteranno alla scoperta di nuovi fenomeni fisici, in particolare in sinergia con i rivelatori di neutrini e onde gravitazionali. IceCube, che ha rivelato i primi segnali astrofisici di neutrini, passerà da 1 a 10 chilometri cubi, e un rilevatore complementare, Km³NeT, opererà nel Mar Mediterraneo. Il panorama dei rivelatori di onde gravitazionali si sta espandendo a una rete globale. I colori dei fotoni si arricchiranno di nuovi sapori nel contesto multimessaggero, e la fisica dei raggi cosmici rimarrà all'avanguardia della scienza.

Ringraziamento

Questo articolo è in gran parte una versione tradotta in italiano e aggiornata dell'articolo *Cosmic Rays* di A. De Angelis pubblicato sulla rivista *Nuovo Saggiatore*, vol. 35 (2019), p. 9.

Ringrazio Vincenzo Flaminio per l'accurata revisione.



[1] Si veda per esempio A. De Angelis, *L'Enigma dei Raggi Cosmici*, con prefazione di Margherita Hack, Springer, Milano (2010); seconda edizione in preparazione

- [2] Si veda per esempio A. De Angelis e M. Pimenta, *Introduction to Particle and Astroparticle Physics: Multimessenger Astronomy and its Particle Physics Foundations*, con prefazione di Francis Halzen, Springer, Heidelberg (2018)
- [3] K. Greisen, *End to the cosmic-ray spectrum?*, Phys. Rev. Lett. 16 (1966) 748
- [4] G.T. Zatsepin and V.A. Kuzmin, *Upper limit of spectrum of cosmic rays*, J. Exp. Theor. Phys. Lett. 4 (1966) 78
- [5] IceCube Collaboration, *Evidence for High-Energy Extraterrestrial Neutrinos at the IceCube Detector*, Science 342 (2013) 1242856
- [6] T. Wulf, *On the radiation of high penetrating power that exists in the atmosphere*, Phys. Zeit. 1 (1909) 152
- [7] Domenico Pacini, *La radiazione penetrante alla superficie ed in seno alle acque*, Nuovo Cim. VI/3 (1912) 93
- [8] Albert Gockel, *Measurement of penetrating radiation during balloon flights*, Phys. Zeit. 12 (1911) 595
- [9] Victor F. Hess, *Observations in low level radiation during seven free balloon flights*, Phys. Zeit. 13 (1912) 1084; trad. inglese in arXiv:1808.02927
- [10] L.W. Alvarez, Arthur H. Compton, *A positively charged component of cosmic rays*, Phys. Rev. 43 (1933) 835
- [11] T.H. Johnson, *Coincidence counter studies of the corpuscular component of the cosmic radiation*, Phys. Rev. 45 (1934) 569
- [12] B. Rossi, *Directional measurements on the cosmic rays near the geomagnetic equator*, Phys. Rev. 45 (1934) 212
- [13] Carl D. Anderson, *The positive electron*, Phys. Rev. 43 (1933) 491
- [14] I rapporti e le altre informazioni relative al Premio Nobel per la Fisica del 1936 a cui si fa riferimento nel testo sono materiale non pubblicato, ma disponibile per la ricerca storica presso il Centro di Storia della Scienza dell'Accademia Reale Svedese delle Scienze di Stoccolma, Svezia, e sono stati ottenuti grazie al professor Per Carlson del KTH di Stoccolma
- [15] B. Rossi, *Misure della distribuzione angolare di intensità della radiazione penetrante all'Asmara*, Suppl. la Ricerca Scientifica 1 (1934) 579
- [16] P. Auger, P. Ehrenfest, R. Maze, J. Daudin, R. A. Fréon, *Extensive Cosmic-Ray Showers*, Rev. Mod. Phys. 11 (1939) 288
- [17] J.W. Cronin, *The 1953 Cosmic Ray Conference at Bagnères de Bigorre*, Eur. Phys. J. H 36 (2011) 183
- [18] K. Niu, E. Mikumo, Y. Maeda, *Possible Decay in Flight of a New Type Particle*, Prog. Theor. Phys. 46 (1971) 1644
- [19] R. Hill, K.W. Masui, D. Scott, *The Spectrum of the Universe*, Applied Spectroscopy 72 (2018) 663
- [20] B.P. Abbott et al., *Observation of gravitational waves from a binary black hole merger*, Phys. Rev. Lett. 116 (2016) 061102
- [21] B.P. Abbott et al., *Multi-messenger Observations of a Binary Neutron Star Merger*, Astrophysical Journal Lett. 848 (2017) L12

- [22] The IceCube Collaboration et al., *Multimessenger observations of a flaring blazar coincident with high-energy neutrino IceCube-170922A*, *Science* 361 (2018) 6398
- [23] Z. Cao et al., *Ultrahigh-energy photons up to 1.4 PeV from 12 γ -ray Galactic sources*, *Nature* 594 (2021) 33



Alessandro De Angelis: è un fisico delle alte energie e un astrofisico, professore a Padova e a Lisbona. Il suo principale interesse di ricerca è la fisica fondamentale (in particolare l'astrofisica e la fisica delle particelle elementari); recentemente studia soprattutto la propagazione cosmologica dei fotoni, ed è il Principal Investigator del progetto spaziale ASTROGAM. È stato *staff member* al CERN fino al 2000, e successivamente tra i membri fondatori del telescopio Fermi della NASA e per molti anni Project Scientist dei telescopi MAGIC a La Palma. Affianca alla passione per la ricerca la passione per la storia della scienza. È stato *visiting professor* all'ICRR di Tokyo, all'Istituto Max Planck di Monaco, a Parigi VI.