

TEMA DEL MESE

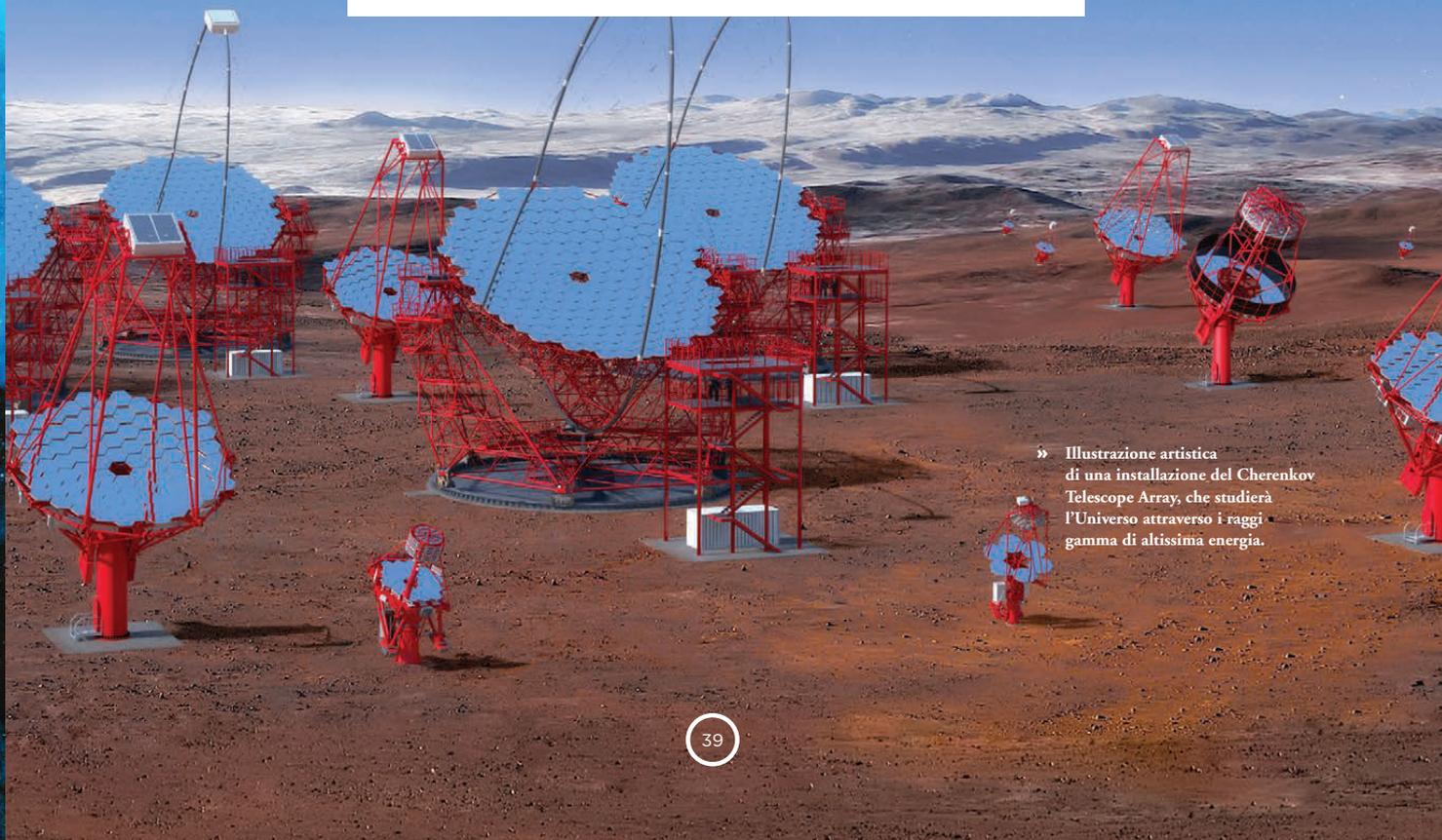
DIPATRIZIA CARAVEO

PEVATRONI DOVE NASCONO I SUPER RAGGI COSMICI

STRUMENTI SEMPRE PIÙ SOFISTICATI INDAGANO I MISTERI
DELLE PARTICELLE ENERGETICHE CHE PIOVONO DALLO SPAZIO

» Un candidato Pevatrone: l'ammasso di stelle *Cygnus OB2*; composizione di riprese effettuate dal satellite *Chandra* nei raggi X (emissione diffusa rossa e sorgenti puntiformi blu), dall'*Isaac Newton Telescope* nell'ottico (emissione diffusa azzurro) e dallo *Spitzer Space Telescope* in infrarosso (arancione).

Da poco più di un secolo sappiamo di vivere sotto una costante pioggia di particelle di alta energia, molto più alta di quella raggiungibile nei nostri acceleratori più potenti, come al Cern di Ginevra. E ancora ci chiediamo da dove vengano e quali corpi celesti siano in grado di accelerare queste particelle. La loro scoperta è dovuta a Domenico Pacini, assistente al Regio Ufficio Centrale di Meteorologia e di Geodinamica, e a Victor Hess, assistente al Radium-Institut di Vienna. Tra il 1907 e il 1911, con l'aiuto della Regia Marina, Pacini fece misure subacquee, mentre, nel giugno 1911, Hess usò palloni stratosferici per sollevarsi dal suolo. Entrambi conclusero che doveva esistere una radiazione che veniva dall'alto alla quale Robert Millikan diede poi il nome di "raggi cosmici". L'Italia fu in prima linea nella ricerca per cercare di capire la natura di queste radiazioni, che molti pensavano fossero elettroni. Nel 1922 Bruno Rossi, in una storica spedizione in Etiopia, dimostrò invece che sono protoni. La pioggia di particelle che ci colpisce continuamente è in realtà costituita da prodotti secondari, frutto dell'interazione dei raggi cosmici primari con gli atomi dell'atmosfera. Da questa interazione nasce una cascata di particelle, fotoni e neutrini. Bruno Rossi fu uno dei primi a misurare gli sciami di particelle nell'atmosfera. Ma è stato studiando l'interazione di queste particelle con camere a bolle oppure con lastre fotografiche trasportate in vetta alle montagne che sono



» Illustrazione artistica di una installazione del Cherenkov Telescope Array, che studierà l'Universo attraverso i raggi gamma di altissima energia.



» I telescopî *Magic* alle Canarie (cortesia Lucio Angelo Antonelli).

state fatte molte scoperte nel campo della fisica delle particelle. Giuseppe Occhialini, collega poco più giovane di Bruno Rossi, ospite di un laboratorio inglese, nei raggi cosmici trovò l'anti-elettrone (chiamato poi positrone); peccato che Carl Anderson l'avesse preceduto di poco. La scoperta dei raggi cosmici venne premiata con il Nobel nel 1936. Il comitato riconobbe il contributo di Pacini, morto due anni prima, e assegnò ad Hess metà del premio mentre l'altra metà andò a Carl Anderson per il positrone.

DA TERRA E DALLO SPAZIO

I raggi cosmici sono stati un ausilio fondamentale alla fisica e sono stati la fonte primaria di particelle di alta energia fino alla costruzione dei primi acceleratori. Questi strumenti non riusciranno mai a raggiungere le energie dei raggi cosmici più energetici, ma hanno il vantaggio di operare in condizioni controllate e riproducibili.

Proprio a causa della loro energia inarrivabile, lo studio dei raggi cosmici più energetici ha sempre esercitato un fascino particolare,

perché l'esistenza di particelle con energia così alta ci interroga sulle condizioni che si devono sviluppare nelle loro sorgenti.

Per studiare i raggi cosmici primari, bisogna andare a catturarli nello spazio, prima che incontrino gli atomi dell'atmosfera. Tuttavia, gli strumenti in orbita possono raccontare solo una parte della storia, perché al crescere dell'energia, il flusso dei raggi cosmici diventa sempre più basso ed è indispensabile avere aree di raccolta grandissime, possibili solo sulla superficie terrestre,

dove però arrivano solo i prodotti dell'interazione con l'atmosfera. È allora necessario risalire alle caratteristiche della particella primaria, a partire dallo sciame di prodotti secondari che sono stati misurati. Combinando le misure spaziali con quelle terrestri, si può costruire lo spettro dei raggi cosmici, cioè l'andamento del flusso registrato in funzione dell'energia. Più si sale in energia e minore è il numero delle particelle, ma la distribuzione mostra due cambiamenti di pendenza: il primo è un aumento, detto "ginocchio", il secondo è un appiattimento, detto "caviglia". Recentemente sono stati rivelati raggi cosmici con energie che si misurano in PeV (petaelettronvolt, equivalenti a un milione di miliardi di eV). E questo rinnova uno dei quesiti più affascinanti dell'astrofisica: quali oggetti celesti possono essere capaci di accelerare particelle a energie di gran lunga più elevate di quelle raggiunte nei più grandi laboratori terrestri?

A CACCIA DEI PEVATRONI

Le sorgenti di queste particelle sono state chiamate Pevatroni, per analogia con il nome Tevatron dato a un acceleratore che ha operato fino al 2011 al FermiLab di Chicago. I Pevatroni possono essere ovunque nell'Universo, ma le particelle che emettono hanno un "nemico" che le può distruggere: la radiazione cosmica di fondo. Se una particella di alta energia incontra un fotone del fondo cosmico, la particella cederà parte della sua energia al fotone che aumenterà la sua frequenza, mentre la particella perderà la sua eccezionalità. Questo effetto, chiamato Gzk (dai



» L'astronomo Domenico Pacini (1878-1934), pioniere nello studio dei raggi cosmici.

nomi dei fisici Greisen, Zatsepin e Kuzmin) limita il viaggio delle particelle a circa 600 milioni di anni luce. Al di là di questo limite, l'Universo diventa opaco per i super raggi cosmici. Questo effetto, unito alla diminuzione del flusso con l'inverso del quadrato della distanza, implica che il posto migliore per cercare i Pevatroni sia la nostra Galassia. Ma dove? Misurare la direzione di arrivo dei raggi cosmici non dà informazioni utili, perché queste particelle vengono deviate dai campi magnetici che permeano tutta la Galassia. Sono campi estremamente deboli, ma agiscono su volumi grandissimi, facendo perdere alle particelle la "memoria" della loro direzione

originale. Ci vengono però in aiuto i raggi gamma, che vengono prodotti quando i raggi cosmici interagiscono con gli atomi di idrogeno del mezzo interstellare. Il raggio gamma prodotto dalla interazione ha circa un decimo dell'energia del raggio cosmico e non viene disturbato dai campi magnetici. Rivelare raggi gamma di 0,1 PeV è una prova convincente che le particelle responsabili abbiano energie intorno al PeV e che siano state quindi prodotte da un Pevatrone. Non che i raggi gamma siano facili da studiare: anche per loro vale la regola della diminuzione del flusso con l'aumentare dell'energia. Quindi, anche i raggi gamma più energetici devono essere studiati da terra, dove



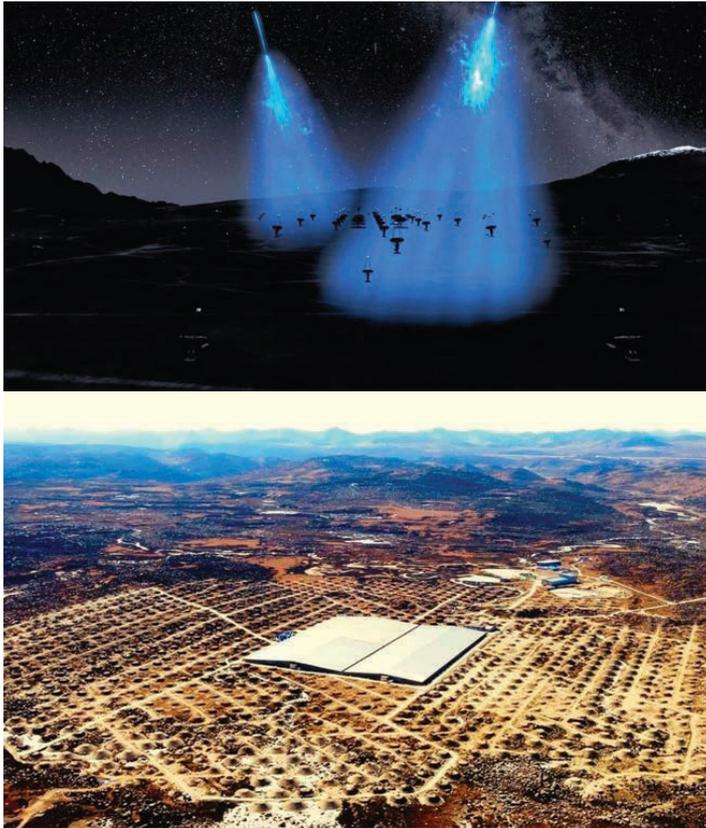
si possono costruire strumenti con grandi aree di raccolta. Come i raggi cosmici, anche i raggi gamma interagiscono con l'atmosfera e danno origine a sciame di particelle, che vanno a colpire i rivelatori al suolo.

GRAZIE A CHERENKOV

Un metodo di raccolta dei raggi gamma utilizza l'effetto Cherenkov, un equivalente del boom sonico che si crea quando si supera la barriera del suono. In questo caso l'effetto si

ha quando le particelle dello sciame viaggiano a velocità superiore a quella della luce nel mezzo (attenzione: non viaggiano a velocità superiore a quella della luce nel vuoto, ma a quella della luce nell'aria, che è minore della velocità limite di 300mila km al secondo). Quando si verificano queste condizioni, le particelle emettono una luce blu, nota come luce Cherenkov, che viene raccolta dai grandi specchi che costituiscono gli strumenti *Magic*, *Hess* e *Veritas* e che saranno alla base dell'osservatorio

Cta (*Cherenkov Telescope Array*), un progetto che vede coinvolti Paesi e ricercatori di tutto il mondo per la realizzazione di due grandi osservatori di luce Cherenkov, uno nell'emisfero nord e uno nell'emisfero sud della Terra. Anche in questo campo si cercano soluzioni che permettano di andare sempre più in alto in energia. L'Istituto nazionale di astrofisica (Inaf) sta costruendo un osservatorio a Tenerife con repliche del telescopio *Astri* già attivo sulle pendici dell'Etna. In Messico è stato costruito



» In alto: illustrazione artistica degli sciami secondari generati da fotoni super energetici che colpiscono l'atmosfera. Qui sopra: il sistema di rivelatori Lhaaso. Al centro le vasche coperte del *Water Cherenkov Detector Array*, circondate dai rigonfiamenti che contengono rivelatori di muoni, ognuno dei quali provvisto di quattro scintillatori.

l'osservatorio Hawc (*High Altitude Water Cherenkov*) che usa enormi taniche di acqua dove le particelle emettono radiazione Cherenkov, mentre in Tibet l'Accademia delle Scienze cinese sta costruendo il mastodontico osservatorio Lhaaso (*Large High Altitude Air Shower Observatory*) che studierà raggi

cosmici e raggi gamma ad energie mai raggiunte, unendo i rivelatori di particelle, con le vasche e gli specchi che sfruttano la radiazione Cherenkov. I risultati ottenuti in circa un anno di osservazione da parte della metà già completata di Lhaaso hanno fatto scalpore per la presenza di una dozzina di Pevatroni,

quasi tutti collegabili a pulsar e alle loro nebulose o a resti di supernova che fanno da corredo, anche se le posizioni delle sorgenti individuate non sono molto precise e spesso sono compatibili con più di un oggetto potenzialmente interessante.

Da uno dei candidati, nella direzione della costellazione del Cigno, è stato rivelato un raggio gamma da 1,4 PeV. È una regione già molto studiata e dalla quale Hawk ha visto raggi gamma da frazioni di PeV che erano stati collegati all'ammasso di stelle *Cygnus OB2*, dove violenti venti stellari possono generare onde di shock capaci di accelerare particelle ad altissime energie con un meccanismo proposto da Enrico Fermi all'inizio degli anni 50.

Uno dei Pevatroni più notevoli è la Nebulosa Granchio (M1), che in 314 giorni ha fatto registrare 89 raggi gamma con energia maggiore di 0,1 PeV, due dei quali con energie rispettivamente di 0,88 e 1,22 PeV. Dato che Lhaaso non ha rivelato segnali pulsati dalla pulsar del Granchio, si pensa che tutto il flusso sia dovuto alla nebulosa. Ora bisogna chiarire le sottigliezze (neanche tanto sottili) della fisica che governa questa straordinaria emissione.

Si prospetta un futuro pieno di sorprese energetiche. Una volta completato, Lhaaso sarà più sensibile e il numero delle sorgenti aumenterà. L'*Astri mini array* dell'Inaf a Tenerife, grazie alla sua migliore risoluzione angolare, potrà arrivare all'identificazione delle sorgenti ultra-energetiche e lo stesso farà, qualche anno dopo ma più in grande, il Cta. Forse le sorgenti dei raggi cosmici più energetici non saranno più così misteriose. ∞