
I Raggi Cosmici e l'universo delle alte energie

Paolo Lipari *Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione Roma*

L'esistenza dei raggi cosmici, è stata scoperta all'inizio del ventesimo secolo come una causa extraterrestre di ionizzazione. Dopo due decenni di studi i fisici sono riusciti a stabilire che i raggi cosmici sono formati da particelle cariche relativistiche, con uno spettro che si estende fino ad altissime energie. Questo risultato richiede l'esistenza di sorgenti astrofisiche la cui natura è però rimasta a lungo sconosciuta, perché le traiettorie delle particelle sono deviate dai campi magnetici interstellari. Negli ultimi anni sono stati fatti enormi progressi nell'identificazione di queste sorgenti grazie ad osservazioni che utilizzano raggi gamma e neutrini. Queste particelle (elettricamente neutre, e che dunque viaggiano in linea retta) sono generate come secondarie dalle interazioni dei raggi cosmici nelle sorgenti, e le loro direzioni d'arrivo puntano verso di esse. L'universo delle alte energie si è mostrato molto ricco, con diverse classi di sorgenti (Supernovae, Pulsar, Nuclei Galattici Attivi, Gamma Ray Bursts, ...). Queste sorgenti sono anche spesso associate ad eventi astrofisi-

ci dove grandi masse subiscono forti accelerazioni, e dunque emettono onde gravitazionali. Futuri studi che combinano questi quattro messaggeri: raggi cosmici, raggi gamma, neutrini ed onde gravitazionali potranno chiarire molte delle questioni ancora aperte, ed esplorare più profondamente un universo pieno di sorprese.

Cosa sono i raggi cosmici?

I **raggi cosmici** sono una pioggia di particelle di altissima energia e velocità molto vicina a quella della luce che arriva continuamente sulla Terra da tutte le direzioni. La maggior parte di queste particelle sono protoni e nuclei atomici completamente ionizzati, una piccola parte è formata da elettroni, ed esiste anche un minuscolo ma importante contributo di particelle di anti-materia: anti-protoni ed anti-elettroni.

L'esistenza dei raggi cosmici è nota ai fisici da oltre un secolo, e dopo alcuni decenni di studio siamo riusciti a comprendere la loro natura. Ma da dove vengono? Quali sorgenti li emettono? Come ottengono la loro elevatissima energia? Molte fondamentali domande sull'origine dei raggi cosmici attendono ancora risposte certe. Gli ultimi anni hanno però visto grandi progressi

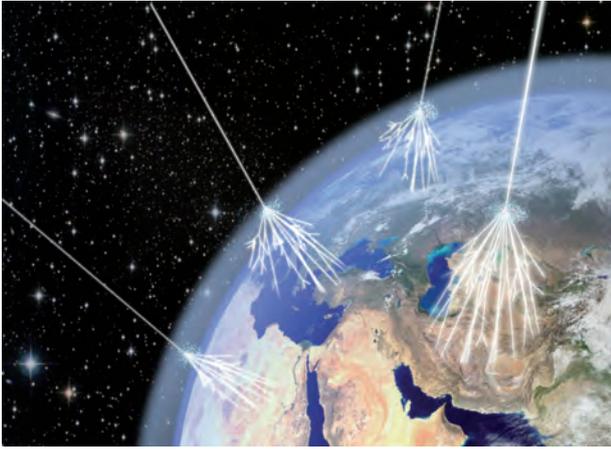


Figura 1: I raggi cosmici primari arrivano continuamente sulla Terra da tutte le direzioni, e generano sciame di secondari nell'atmosfera.

nello studio dei raggi cosmici che ci stanno facendo avvicinare alla soluzione di questi problemi, e allo stesso tempo stanno rivelando l'esistenza di nuovi affascinanti oggetti nel cielo.

La prima e più sorprendente caratteristica dei raggi cosmici è la loro grandissima energia. Per dare un'idea di quanto sia grande possiamo confrontarla con quella di particelle più familiari. L'energia può essere misurata utilizzando molte unità differenti, Joules, ergs, kilowattora, barili di petrolio e così via. I fisici che studiano i raggi cosmici utilizzano un'unità chiamata elettron-Volt (eV), adatta a descrivere i fenomeni del mondo microscopico. Le molecole dell'aria ad una temperatura normale, di circa 20 gradi centigradi, si muovono caoticamente viaggiando ad una velocità media di circa 2000 km/sec e posseggono un'energia cinetica media di circa 0.04 eV. Alla superficie del Sole la temperatura è molto più elevata, circa 6000 gradi, e le particelle del plasma solare trasportano in media un'energia venti volte maggiore, ovvero circa 1 eV. La luce del Sole è formata da un insieme di granuli discreti, o fotoni, emessi come scintille quando le particelle del plasma si scontrano, e trasportano la stessa energia media di circa 1 eV. Le particelle emesse dalle sostanze radioattive, i raggi alfa, beta e gamma emergono dal profondo dei nuclei atomici con un'energia elevatissima che si misura in milioni di elettron-Volt (10^6 eV) (e per questo possono essere molto distruttivi per gli organismi biologici).

Ora l'energia dei raggi cosmici ha uno spettro che comincia a circa un miliardo di eV (10^9 eV)

e si estende ad energie veramente spaventose. Le particelle di energia più elevata possono infatti trasportare cento miliardi di miliardi di eV (10^{20} eV). Per chiarezza, bisogna dire che queste energie sono spaventose perchè sono trasportate da un'unica particella. Le energie massime osservate sono più o meno uguali a quella di una palla da tennis nel servizio di un buon giocatore, che certo non è poco, ma non sembra nulla di straordinario, se non ci si ferma a pensare che una palla da tennis contiene circa 3×10^{25} tra protoni e neutroni, mentre nei raggi cosmici tutta questa energia può essere trasportata da un singolo protone.

Le energie di cui stiamo parlando sono energie cinetiche ovvero associate alla velocità ed alla massa di un corpo (o di una particella). Nella nostra esperienza quotidiana, quando consideriamo palle da tennis, proiettili o automobili in movimento, ovvero cose che si muovono a velocità piccole rispetto a quella della luce (di trecentomila chilometri al secondo) la relazione tra energia, massa e velocità è data dalla semplice equazione $E = \frac{1}{2} m v^2$, dove m è la massa del corpo, e v la sua velocità. Questa equazione dice che l'energia è proporzionale alla massa di una particella e cresce con il quadrato della sua velocità, ma l'equazione non è più valida quando la velocità di un corpo si avvicina a quella della luce. Questa infatti è una velocità limite non raggiungibile da un corpo di massa finita, mentre particelle di massa nulla come i fotoni devono muoversi sempre esattamente a questa velocità, senza mai potere rallentare. Una particella può comunque trasportare un'energia arbitrariamente elevata¹, e quanto più grande è questa energia, tanto più la sua velocità si avvicina a quella della luce, senza però mai riuscire a raggiungerla. Il risultato è che le particelle dei raggi cosmici hanno tutte una velocità molto vicine a quella della luce.

¹L'equazione che descrive l'energia di una particella per una velocità arbitraria è stata formulata da Albert Einstein, ed è: $E = mc^2 / \sqrt{1 - v^2/c^2}$ dove c indica la velocità della luce. È facile vedere che quando v si avvicina a c , il denominatore si annulla, e l'energia diverge all'infinito. Quando la velocità v è uguale a zero, l'energia di una particella in quiete non si annulla ma prende il valore $E = mc^2$.

La scoperta dei raggi cosmici

È interessante ripercorrere brevemente la storia di come si sia prima scoperta l'esistenza dei raggi cosmici e poi compresa la loro natura. (Si veda anche l'articolo di Alessandro De Angelis in questo numero di Ithaca.) La scoperta è avvenuta all'inizio del ventesimo secolo. A quell'epoca i fisici avevano cominciato a comprendere la struttura della materia, e scoperto che gli atomi non sono indivisibili come suggerito dal loro nome, ma sono formati da componenti più elementari e dotati di carica elettrica. La prima particella, l'elettrone venne infatti scoperta nel 1897 dal fisico inglese J.J. Thomson. Si comprese anche che gli atomi possono ionizzarsi, e cioè dividersi in elettroni e ioni positivi.

Lo studio dei fenomeni elettrici dimostrò che l'aria, e più in generale tutti i gas, sono sempre, anche se debolmente, ionizzati, cioè contengono una piccola percentuale di atomi scissi in elettroni liberi e ioni positivi. Poiché elettroni e ioni positivi tendono a ricombinarsi riformando atomi neutri, qualcosa come una radiazione ionizzante, deve dunque agire sulla materia per estrarre continuamente gli elettroni dagli atomi.

Un'importante sorgente di radiazione ionizzante, la radioattività, era stata scoperta negli ultimi anni del XIX secolo quando il fisico francese Henri Becquerel nel 1896 si rese conto che l'Uranio emette continuamente una radiazione capace di annerire le emulsioni fotografiche e appunto di ionizzare la materia. Nuovi studi sulla radioattività, in particolare quelli di Pierre e Marie Curie rivelarono presto l'esistenza di altre sostanze radioattive come Torio, Polonio e Radio, e gli esperimenti di Ernest Rutherford dimostrarono l'esistenza di tre tipi di radioattività: i raggi alfa, beta e gamma, dovuti all'emissione di nuclei di elio, elettroni e fotoni, e che queste particelle trasportavano ciascuna una grandissima energia di milioni di elettron-Volt. L'osservazione della radioattività apriva una finestra sul mondo ancora sconosciuto dei nuclei atomici.

La capacità delle sostanze radioattive di ionizzare la materia offriva un attraente e semplice metodo per studiare sperimentalmente la presenza di tracce di elementi radioattivi in diversi materiali, perché l'intensità della causa ionizzante può essere facilmente misurata osservando

la velocità con cui si scarica un elettroscopio². Questa velocità è infatti proporzionale al tasso di creazione di ioni nel gas contenuto nello strumento. Gli studi dei fisici, in particolare quelli di Julius Elster ed Hans Geitel, dimostrarono che anche nell'apparente assenza di sostanze radioattive, un tasso di ionizzazione risulta sempre misurabile. Già nel 1901 Charles Wilson suggerì che forse questo non era dovuto alla presenza di piccole tracce di materiali radioattivi, ma era invece l'indicazione dell'esistenza di una sorgente extraterrestre di radiazione ionizzante.

Per oltre un decennio fisici di diversi paesi in Europa cercarono di chiarire questo problema, portando elettroscopi in diversi luoghi per misurare come il tasso di creazione di ioni cambiava in diverse situazioni. Ad esempio nel 1910 Theodor Wulff (un fisico tedesco che era anche un sacerdote) portò un elettroscopio in cima alla Tour Eiffel a Parigi, per vedere come l'azione ionizzante cambiava sollevandosi a trecento metri di altezza, ma i suoi risultati furono inconclusivi.



Figura 2: Domenico Pacini (1878–1934) ha studiato la radiazione ionizzante “alla superficie ed in seno alle acque” ed è arrivato vicinissimo a dimostrare l'esistenza di una componente extraterrestre.

Un importante pioniere in queste ricerche è stato il fisico italiano Domenico Pacini, che ebbe l'idea di misurare l'azione ionizzante sott'acqua. Pacini osservò che se la radiazione ionizzante

²L'elettroscopio è un semplice strumento messo a punto da Alessandro Volta, che permette di stabilire se un corpo possiede una carica elettrica. Lo strumento consiste in due lamine di metallo racchiuse in un recipiente di vetro. Le lamine si separano quando posseggono una carica elettrica per la repulsione elettrostatica. Quando nel gas del recipiente si formano ioni, questi si trasferiscono alle lamine ed annullano la carica. La velocità con cui le lamine (o foglioline) ritornano alla posizione normale (quella che si ha in assenza di carica) è proporzionale all'intensità della radiazione ionizzante.

è extraterrestre, ed arriva dal cielo, i suoi effetti dovrebbero diminuire con la profondità. Nel suo lavoro più importante pubblicato nel 1911 sul Nuovo Cimento con titolo "La radiazione penetrante alla superficie ed in seno alle acque", Pacini presentò osservazioni del tasso di ionizzazione misurato alla superficie ed alla profondità di circa tre metri fatte nel mare a Livorno e nel lago di Bracciano. Pacini trovò che la causa ionizzante diminuiva con la profondità, ed era "indipendente dall'azione diretta delle sostanze radioattive del terreno". Per molti questi risultati possono essere considerati la prima dimostrazione dell'esistenza di una radiazione ionizzante extraterrestre.

Altri scienziati di diversi paesi europei contribuirono a dimostrare l'esistenza di questa radiazione extraterrestre. I risultati più convincenti vennero ottenuti dal fisico austriaco Victor Hess, che riuscì a misurare il tasso di ionizzazione ad alta quota, portando i suoi elettroscopi in volo su una mongolfiera. Il volo più lungo e di maggiore successo si svolse il 7 agosto del 1912, quando una mongolfiera con a bordo Hess, un pilota ed un meteorologo, volò per sei ore da Aussig in Boemia fino a Berlino superando i cinquemila metri di altezza. Le misure dimostrarono chiaramente che il tasso di ionizzazione aumentava con la quota, e Victor Hess arrivò alla conclusione che: "I risultati delle mie osservazioni si spiegano meglio assumendo che una radiazione di alto potere ionizzante entri dall'alto nella nostra atmosfera". Grazie a questo risultato, nel 1936 Victor Hess ricevette il premio Nobel per la fisica con la motivazione "per la sua scoperta della radiazione cosmica".

Negli anni seguenti il tasso di ionizzazione venne estesamente studiato in funzione della quota e della posizione geografica, senza ottenere grandi progressi nella comprensione della sua natura. La teoria comunemente accettata era che la radiazione extraterrestre era formata da raggi gamma, la più penetrante delle tre forme di emissione delle sostanze radioattive. La parola "raggi cosmici" venne introdotta da Robert Millikan nel 1925, che formulò un'ambiziosa (e completamente sbagliata) teoria secondo la quale questi raggi gamma venivano generati nello spazio extragalattico durante la continua formazione di nuclei atomici, ed erano dunque i "vagiti



Figura 3: Una dimostrazione convincente che una forma di radiazione ionizzante è di natura extraterrestre venne ottenuta con misure su pallone. Walter Kolhörster (nell'immagine con un assistente) estese nel 1913 le misure di Victor Hess.

di nascita" degli elementi.

La natura extragalattica dei raggi cosmici era suggerita dal fatto che la radiazione è in ottima approssimazione isotropa, ed arriva in modo quasi perfettamente uniforme da tutte le direzioni. L'isotropia dei raggi cosmici in realtà è generata dal fatto che le particelle primarie, quelle che arrivano sulla Terra dallo spazio, hanno carica elettrica e sono quindi deviate dai campi magnetici che permeano lo spazio. Questo effetto rimescola le direzioni delle particelle dei raggi cosmici che non puntano più alle loro sorgenti.

Anche la Terra (come sanno tutti coloro che hanno utilizzato una bussola) possiede un campo magnetico, e gli effetti del campo geomagnetico lasciano la loro impronta sulle distribuzioni dei raggi cosmici, se questi hanno una carica elettrica non nulla. L'effetto più importante è che il flusso di particelle che arriva alla superficie della Terra dipende dalla latitudine magnetica³, ed è massimo ai poli e minimo all'equatore. Questo effetto di latitudine venne osservato per la

³Il campo magnetico della Terra è in buona approssimazione dipolare, ma l'asse di questo dipolo non coincide con l'asse di rotazione terrestre, e perciò i poli magnetici non coincidono con quelli geografici.

prima volta da Jacob Clay nel 1927, ed in seguito in modo più convincente da Arthur Compton nel 1933, grazie ad un dettagliato studio della ionizzazione esteso a tutto il mondo. Queste osservazioni dimostrarono che la maggior parte dei raggi cosmici hanno carica elettrica ma non erano sufficienti per determinare il segno di questa carica. Un secondo effetto del campo magnetico terrestre venne però osservato dopo poco tempo, l'effetto est-ovest, vale a dire un piccolo eccesso di particelle che viaggiano da ovest verso est, rispetto a particelle che viaggiano in direzione opposta (da est verso ovest). Questo effetto dimostra che la maggior parte delle particelle dei raggi cosmici hanno carica elettrica positiva. Quando questo risultato fu ottenuto per la prima volta, fu una grande sorpresa, perché la maggior parte dei fisici si aspettava che se i raggi cosmici avevano carica elettrica, dovevano essere elettroni.

La composizione (ed anche lo spettro di energia) dei raggi cosmici primari venne misurata in seguito grazie a telescopi posizionati ad alta quota su palloni sonda o satelliti, ed in grado di osservare la particelle primarie prima della loro interazione con l'atmosfera. Le misure confermarono che la maggior parte delle particelle primarie sono protoni.

Particelle elementari

Lo studio dei raggi cosmici è stato intimamente legato alla nascita ed allo sviluppo della fisica delle particelle elementari. Alla fine degli anni '20 del ventesimo secolo, lo sviluppo di nuove tecniche sperimentali che permettevano di misurare e visualizzare le particelle della radiazione cosmica diede inizio a una nuova fase di rapido progresso. Un primo esperimento chiave venne svolto nel 1928-1929 da due fisici tedeschi Walter Bothe and Werner Kolhörster, utilizzando dei nuovi rivelatori conosciuti come i tubi Geiger-Müller (dal nome dei fisici che li avevano inventati). Questi rivelatori segnalavano con un clic, ovvero un impulso elettrico, lo spezzarsi di un atomo con la creazione di un elettrone libero ed uno ione positivo. La nuova, ed importantissima idea di Bothe e Kolhörster fu di mettere in coincidenza due rivelatori Geiger-Müller uno sopra l'altro ad una distanza di alcuni centime-

tri. I due fisici trovarono che molto spesso i due rivelatori davano segnali allo stesso tempo, indicando che erano stati attraversati da una stessa particella, capace di ionizzare atomi in tutti e due gli strumenti. Alcune di queste particelle dovevano anche essere straordinariamente penetranti, perché inserendo un blocco di oro di alcuni centimetri di spessore tra i due contatori, la frequenza delle coincidenze diminuiva solo parzialmente. Questi risultati dimostravano che i raggi cosmici non erano raggi gamma, ma avevano una natura corpuscolare, con proprietà nuove e sorprendenti.

Bruno Rossi, un giovane fisico italiano (all'epoca aveva solo 23 anni) che avrebbe dato un grande contributo allo studio dei raggi cosmici scrive così della sua reazione nel leggere il lavoro dei fisici tedeschi:

“L'articolo di Bothe and Kolhörster arrivò come un lampo di luce, che rivelava l'esistenza di un mondo insospettato, pieno di misteri, e che nessuno aveva ancora cominciato ad esplorare”.

Gli anni successivi videro i fisici lavorare intensamente ad esplorare quel mondo insospettato. Seguire passo dopo passo i progressi dei fisici nella comprensione della natura dei raggi cosmici sarebbe molto interessante, ma è troppo lungo per questo articolo (un bellissimo racconto di quegli anni è contenuto nel classico libro di Bruno Rossi “Raggi Cosmici” che lo descrive come “una delle più straordinarie avventure nella storia della scienza”) [1].

Per semplificare la nostra discussione possiamo partire dalla soluzione. Abbiamo già detto che i raggi cosmici primari, quelli che arrivano alla Terra dallo spazio, sono particelle di altissima energia, che viaggiano nell'aria lasciando dietro di loro una scia di atomi ionizzati. Generare questa ionizzazione fa però perdere alle particelle solo una piccola parte della loro energia, ma ogni tanto un raggio cosmico passa sufficientemente vicino ad un nucleo atomico ed avviene un'interazione nucleare. Queste collisioni nucleari sono rare (le particelle primarie possono attraversare in media circa un decimo dell'atmosfera prima di interagire) perché i nuclei atomici hanno dimensioni lineari circa centomila volte più piccole di quelle dell'involucro di elettroni

che li circonda. In queste interazioni con i nuclei la particella proiettile viene assorbita, e dalla collisione emergono particelle di tipo diverso, in un numero che in media (ma con grandi fluttuazioni) cresce con l'energia del proiettile, arrivando anche a centinaia di secondari per interazioni ad alta energia. Le particelle nello stato finale di una collisione nucleare non sono solo i frammenti delle particelle interagenti, ma per la maggior parte sono create dal vuoto nel momento dell'interazione, in modo analogo a come lo scontro frontale tra due macchine produce non solo rottami, ma crea anche scintille che certo prima non facevano parte delle macchine stesse. Per comprendere la natura di queste scintille bisogna introdurre due concetti fondamentali, il primo è la celebre relazione di equivalenza tra massa ed energia scoperta da Einstein: $E = mc^2$. Questa equazione dice che è possibile materializzare l'energia cinetica delle particelle in collisione creandone di nuove, se l'energia è sufficientemente grande. Il secondo concetto importante è che esistono delle leggi di conservazione che devono essere rispettate quando nuove particelle vengono create dal vuoto. Ad esempio, la legge di conservazione della carica elettrica dice che la somma delle cariche di tutte le particelle di un sistema fisico rimane sempre costante. Un'altra importantissima legge fondamentale che gioca un ruolo cruciale nei processi di creazione di nuove particelle è il principio che per ogni particella di materia, ne esiste un'altra di anti-materia che ha massa identica, lo stesso spin, e tutte le cariche (o numeri quantici interni) opposti. Ad esempio, oltre all'elettrone, che ha carica elettrica negativa, esiste l'anti-elettrone (chiamato anche positrone) che ha la stessa massa ma carica elettrica uguale ed opposta (e dunque positiva). Oltre al protone, esiste l'anti-protone con carica elettrica opposta (e dunque negativa), ed anche carica nucleare opposta⁴ La legge sulla sim-

⁴Il protone, oltre alla forza elettromagnetica, è sensibile anche alla forza nucleare conosciuta anche come l'interazione forte) che è quella che tiene protoni e neutroni legati nei nuclei atomici. Le particelle sensibili a questa forza posseggono una carica nucleare, analoga alla carica elettrica, che i fisici chiamano anche colore), e le loro anti-particelle hanno carica opposta. Il colore è definito non da uno, ma da due numeri, e può essere visualizzato come un punto su un piano. I quark esistono in tre colori differenti, che su questo piano sono rappresentati dai vertici di un triangolo equilatero, men-

metria materia/anti-materia è stata compresa per primo dal grande fisico inglese Paul Dirac, ed emerge necessariamente quando si mettono insieme la teoria della Relatività di Einstein con i principi della Meccanica Quantistica. La creazione di una coppia particella/anti-particella rispetta automaticamente tutte le leggi di conservazione e dunque è possibile quando l'energia disponibile è sufficiente.

Le particelle ed anti-particelle create nelle interazioni dei raggi cosmici primari con i nuclei dell'aria si propagano nell'atmosfera, in alcuni casi si disintegrano spontaneamente, in altri possono interagire nuovamente, generando così altre particelle (ed antiparticelle). Sono questi raggi cosmici secondari le particelle che sono osservate vicino alla superficie della Terra (attraverso la ionizzazione dei gas, oppure in rivelatori di diverso tipo). L'intricato problema affrontato dai fisici nelle decadi degli anni '30 e '40 fu di capire quali particelle sono prodotte nelle interazioni di alta energia, quali sono le loro proprietà, come si propagano nell'aria, per poi risalire alla natura e proprietà della radiazione primaria. Lo studio dei raggi cosmici coincise dunque con la nascita e lo sviluppo della fisica delle particelle elementari, dedicata allo studio delle componenti fondamentali della materia.

Possiamo ricordare alcuni degli sviluppi più profondi e rivoluzionari. Il primo avvenne nel 1932, e fu l'osservazione dell'anti-particella dell'elettrone da parte di Carl Anderson utilizzando un rivelatore, chiamato camera a nebbia che permette di visualizzare la traiettoria di una particella carica relativistica come una sequenza di goccioline che si formano intorno agli atomi ionizzati dal suo passaggio. Nell'esperimento di Anderson, la camera a nebbia era posta all'interno di un magnete, in modo che le traiettorie delle particelle cariche che la attraversavano venissero incurvate dal campo magnetico. Il verso della curvatura indicava il segno della carica elettrica. Con grande sorpresa Anderson trovò che alcune delle particelle osservate avevano la massa di un elettrone, ma carica positiva. Paul Dirac aveva da poco predetto l'esistenza dell'anti-elettrone, e

tre gli anti-quark hanno colore opposto. Neutrone ed anti-neutrone sono formati da quarks ed anti-quarks e sono particelle differenti.

dunque la scoperta fu una spettacolare conferma di questa predizione. Ci si rese presto conto che elettroni e anti-elettroni (chiamati anche comunemente positroni) sono in buona approssimazione ugualmente abbondanti nella radiazione cosmica secondaria, e ne formano una gran parte. La spiegazione di questo fatto venne presto trovata sviluppando la teoria di Paul Dirac, che aveva previsto che fotoni di energia sufficientemente elevata (vale a dire con energia $E > 2m_e c^2$ dove m_e è la massa dell'elettrone) possono (nel campo elettrico di un nucleo dell'aria) trasformarsi in una coppia elettrone/anti-elettrone (e^+e^-).

Gli esperimenti mostrarono anche che gli elettroni e positroni dei raggi cosmici secondari sono accompagnati da un flusso di fotoni di alta energia (o raggi gamma). Queste tre particelle, elettroni, positroni e fotoni formano insieme delle cascate elettromagnetiche. Il meccanismo si può illustrare in questo modo: un primo fotone si converte in una coppia e^-e^+ , queste particelle possono poi emettere altri fotoni cedendo loro parte della loro energia (in processi del tipo $e^\mp \rightarrow e^\mp + \gamma$) che possono a loro volta generare nuove coppie elettrone/positrone e così via. La presenza di elettroni/positroni/fotoni nei raggi cosmici si poteva dunque spiegare assumendo che le particelle primarie dei raggi cosmici nelle loro interazioni potessero generare una gran quantità di raggi gamma. Un'ipotesi che sarebbe stata confermata qualche anno dopo.

Una seconda scoperta di profonda importanza ottenuta già negli anni '30, è stata quella dell'esistenza dei leptoni mu o muoni (indicati con la lettera greca μ^- e μ^+). La prima indiretta indicazione dell'esistenza della nuova particella (e della sua anti-particella) era emersa dall'osservazione che i raggi cosmici secondari erano molto più penetranti delle predizioni teoriche per elettroni ed anti-elettroni, un fenomeno già trovato da Bothe e Kohlörster nei primi esperimenti di coincidenza. Questo risultato era spiegabile solo con una profonda revisione della teoria, oppure con l'esistenza di una nuova particella che costituiva una seconda componente (accanto a quella elettromagnetica formata da elettroni, positroni e fotoni) dei raggi cosmici secondari. Il problema venne chiarito alla fine degli anni '30, quando nelle camere a nebbia che osservavano i raggi cosmici secondari venne identificata una nuova

particella con la stessa carica elettrica dell'elettrone, ma una massa circa 205 volte maggiore. Le proprietà del muone vennero comprese poco a poco, ed un ruolo fondamentale in questo fu svolto dai tre giovani fisici italiani Marcello Conversi, Oreste Pancini ed Ettore Piccioni che grazie a delle ingegnose misure, fatte a Roma in condizioni straordinariamente difficili tra il 1943 ed il 1946, riuscirono a dimostrare che il muone non sente la forza nucleare (quella che tiene insieme protoni e neutroni nei nuclei) e si comporta dunque come un "elettrone pesante"⁵.

La sorgente dei muoni nei raggi cosmici secondari venne compresa grazie alle osservazioni ottenute con una nuova tecnica di rivelazione: le emulsioni nucleari, cioè un tipo di emulsione fotografica, come quella che veniva utilizzata per ottenere immagini quando le tecniche digitali ancora non esistevano. Nella gelatina che è la base dell'emulsione sono sospesi dei cristalli che possono essere impressionati dalla luce, oppure dal passaggio di una particella carica di alta energia. Dopo un processo di sviluppo, i cristalli impressionati si anneriscono e la traiettoria di una particella può essere visualizzata come una sequenza di punti, visibili al microscopio.

Questa tecnica venne inizialmente sviluppata da due ricercatrici di Vienna, Marietta Blau e la sua studentessa Hertha Wambacher, che nel 1937 esposero delle emulsioni preparate a questo scopo in un laboratorio costruito ad alta quota (2300 metri) nelle alpi austriache da Victor Hess. Nelle emulsioni erano visibili delle immagini che chiamarono stelle di disintegrazione ("Zertrümmerungsterne") che interpretarono come le tracce disegnate dai frammenti di un nucleo atomico disintegrato dalla collisione con una particella dei raggi cosmici. Si trattava delle prime immagini di interazioni nucleari. Purtroppo Marietta Blau non ebbe modo di continuare questa promettente linea di studi. Nel 1938 ci fu l'Anschluss, e l'Austria venne assorbita dalla

⁵L'esistenza del muone fu una grande sorpresa per i fisici. È rimasto celebre il commento alla scoperta fatto da Isidor Isaac Rabi: "E questo chi lo ha ordinato?". Anche oggi questa domanda rimane senza risposta. Oggi sappiamo che non solo l'elettrone ma tutte le particelle di spin 1/2 sono non solo duplicate, ma triplicate. Esistono cioè (per ogni tipo) tre diverse particelle con identiche proprietà ma massa differente. L'origine di queste tre generazioni di particelle rimane un mistero che intriga ed affascina i fisici ormai da molti anni.

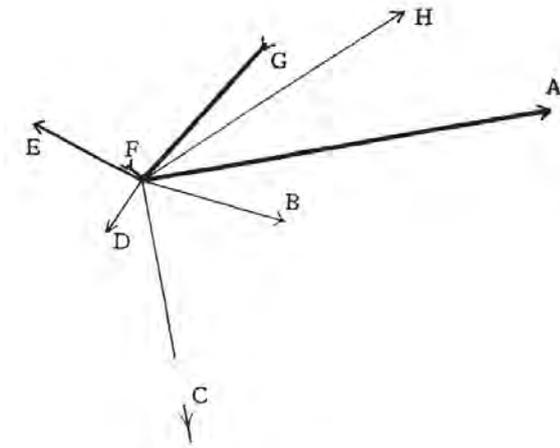


Figura 4: Schema della prima immagine di una stella di disintegrazione (una interazione di un raggio cosmico) ottenuta in emulsione fotografica da Marietta Blau ed Hertha Wambacher.

Germania nazista, e lei, ebrea, fu costretta all'esilio, prima in Messico e poi negli Stati Uniti, e la sua attività di ricerca venne irrimediabilmente interrotta⁶.

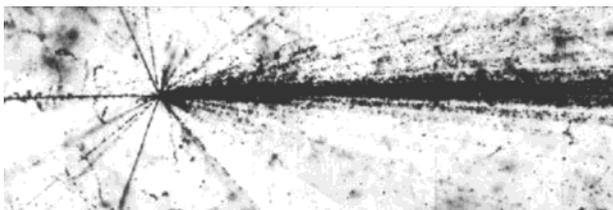


Figura 5: Interazione in emulsione fotografica con la produzione di molte particelle.

La tecnica delle emulsioni nucleari venne presto perfezionata da altri fisici, in particolare da Cecil Powell, Giuseppe Occhialini e Cesar Lattes, che riuscirono a migliorare la sensibilità delle emulsioni aumentando la concentrazione dei cristalli di bromuro d'argento, in modo da permettere la visualizzazione non solo dei frammenti del nucleo (che sono fortemente ionizzanti perché lenti e con grande carica elettrica) ma anche di particelle cariche relativistiche. Powell, Occhialini e Lattes esposero le loro emulsioni in laboratori di alta quota, prima nelle Alpi svizzere, e poi ad altezza ancora maggiore (più di

⁶Un aspetto paradossale di questa storia è che Hertha Wambacher era invece stata iscritta al partito nazista (NSDAP) già dal 1934, quando era ancora illegale in Austria. Dopo la guerra, Marietta Blau venne proposta per due volte al comitato del Nobel da Erwin Schrödinger, ma questa proposta non venne accettata.

5000 metri) nelle Ande boliviane. Le immagini registrate permisero delle scoperte importanti. Nella sua autobiografia Powell scrive:

“[...] un intero nuovo mondo si rivelava [...] Era come se fossimo penetrati all'interno di un giardino recintato, nella protezione del quale molti alberi erano fioriti, e frutta esotica di tutti i tipi era maturata in grande abbondanza”.

I frutti esotici rivelati dalle immagini delle emulsioni erano nuovi tipi di particelle. La prima e più importante scoperta fu quella dei pioni carichi (in simbolo π^+ e π^- , uno l'antiparticella dell'altro) che venivano prodotti in gran numero nelle interazioni nucleari. I pioni sono particelle instabili, che si disintegrano dopo breve tempo, in un muone ed una particella invisibile: un neutrino. Anche il muone è instabile e a sua volta si disintegra in un elettrone (o un positrone a seconda della sua carica) ed altre (due come si comprese in seguito) particelle invisibili⁷. La bellezza della tecnica delle emulsioni nucleari era che in alcuni casi l'intera traiettoria di una particella, dalla nascita al decadimento, avveniva dentro l'emulsione e poteva essere studiata in dettaglio. I risultati ottenuti da Powell, Occhialini e Lattes possono essere riassunti scrivendo le reazioni come:

$$\begin{cases} \pi^\pm \rightarrow \mu^\pm + (\text{una particella invisibile}) \\ \mu^\pm \rightarrow e^\pm + (2 \text{ particelle invisibili}) \end{cases}$$

Le particelle emesse negli stati finali di questi decadimenti non sono veramente invisibili, ma interagiscono solo molto debolmente, e si tratta di neutrini, una componente di importanza fondamentale nel mondo delle particelle elementari.

L'esistenza del neutrino era già stata compresa grazie allo studio dei decadimenti radioattivi beta, dove un nucleo si trasmuta in un altro emettendo un elettrone (il raggio beta). Nello stato finale di un decadimento deve essere presente

⁷Utilizzando le leggi di conservazione di energia e momento, dalla misura della particella visibile nello stato finale è possibile determinare se l'energia e momento invisibile è trasportata da un'unica particella, oppure da diverse particelle. Oggi sappiamo che nel decadimento dei μ^\pm vengono emessi due neutrini.



Figura 6: Nella figura si vedono quattro eventi di decadimento di pioni carichi (ottenuti da Powell, Occhialini e Lattes in Bolivia). Il pione (π^\pm) si arresta nell'emulsione, ed emette un muone (μ^\pm) ed un (invisibile) neutrino. Anche il muone si arresta e decade in un elettrone.

anche un'altra particella invisibile (cioè con interazioni debolissime) e di piccola massa, per trasportare l'energia ed il momento mancante, come suggerito per primo da Wolfgang Pauli nel 1930. La prova sperimentale dell'esistenza del neutrino venne ottenuta solo un quarto di secolo dopo nel 1956 da Clyde Cowan e Frederick Reines che riuscirono ad osservare le rare interazioni dei neutrini emessi da un reattore nucleare (dove i frammenti delle fissioni nucleari generano un grande numero di decadimenti beta).

Una questione aperta era se i neutrini emessi nei decadimenti dei pioni carichi (e quelli emessi nel decadimento dei muoni) fossero o no lo stesso tipo di particella emessa nei decadimenti beta. Questa domanda trovò una risposta quindici anni dopo, quando un esperimento nell'acceleratore di Brookhaven negli Stati Uniti riuscì a dimostrare che si trattava di particelle differenti.

I neutrini infatti formano un doppietto con una particella carica sorella (l'elettrone oppure il muone nei casi presi in considerazione) e questa associazione definisce il sapore del neutrino. Ad esempio, in un decadimento beta un neutrone si trasmuta in un protone, emettendo una cop-

pia ($e^- \bar{\nu}_e$) formata da un elettrone ed un anti-neutrino di tipo sapore elettronico. Il neutrino si ricorda del suo sapore, e quando interagisce si trasforma in un anti-elettrone. Le reazioni⁸ si possono scrivere come:

$$\begin{cases} n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e \\ \bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n \end{cases}$$

Nei decadimenti dei pioni invece i neutrini sono emessi insieme ad un μ^\pm ed hanno sapore muonico, e quando interagiscono generano nuovamente un muone. Le reazioni si possono scrivere come:

$$\begin{cases} \pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu \\ \bar{\nu}_\mu + p \rightarrow \mu^+ + n \end{cases}, \quad \begin{cases} \pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu \\ \nu_\mu + n \rightarrow \mu^- + p \end{cases}$$

È ora abbastanza facile ricostruire il sapore dei due neutrini che sono generati nel decadimento dei muoni. Nella notazione usata oggi queste disintegrazioni si possono scrivere come:

$$\mu^- \rightarrow \nu_\mu + e^- + \bar{\nu}_e, \quad \mu^+ \rightarrow \bar{\nu}_\mu + e^+ + \nu_e.$$

Questi decadimenti possono essere descritti nel seguente modo: il muone si trasmuta nel neutrino (o anti-neutrino) del suo stesso sapore, ed emette una coppia ($e^- \bar{\nu}_e$) oppure ($e^+ \nu_e$) di un elettrone ed un anti-neutrino elettronico (o lo stato simmetrico).

Per completare questa discussione va osservato che studi recenti hanno dimostrato che in realtà quello che abbiamo descritto è il sapore dei neutrini subito dopo la loro creazione, ma questo sapore cambia periodicamente nel tempo. Un fenomeno che è stato predetto dal fisico italiano Bruno Pontecorvo, e dimostrato sperimentalmente solo negli ultimi anni. Per la scoperta di questo importante fenomeno, conosciuto come le oscillazioni di sapore dei neutrini, il premio Nobel per la fisica del 2015 è stato assegnato a Takaaki Kajita ed Arthur McDonald. È per studiare queste oscillazioni (o cambi periodici) del sapore che fasci di neutrini creati in laboratorio vengono fatti viaggiare per lunghe

⁸Guardando la forma di queste reazioni non è difficile capire perché si è scelto di chiamare anti-neutrino (e usare la notazione con la barra sopra il simbolo) la particella quasi invisibile emessa insieme all'elettrone.

distanze, come ad esempio dal laboratorio del CERN a Ginevra al laboratorio sotterraneo del Gran Sasso.

La scoperta dei pioni carichi (che sono la sorgente dei muoni) suggerì anche quale fosse la sorgente della componente elettromagnetica (elettroni, positroni e fotoni) nei raggi cosmici secondari. Nel 1948 alcuni fisici (Lewis, Oppenheimer e Wouthuysen) formularono l'ipotesi che i pioni carichi avevano un compagno neutro, il π^0 che veniva creato con abbondanza nelle interazioni nucleari, e che questa particella (che essendo priva di carica elettrica non lasciava tracce nelle emulsioni nucleari) si disintegrava in due fotoni:

$$\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$$

e che questi fotoni fossero la sorgente di cascate elettromagnetiche. L'esistenza del π^0 venne confermata due anni dopo, in uno dei primi esperimenti che studiavano le interazioni nucleari utilizzando non più i raggi cosmici, ma fasci di particelle accelerate artificialmente.

I tre pioni (π^+ , π^- e π^0) sono le particelle create con maggior abbondanza nelle interazioni nucleari, ma non sono le sole. I fisici cominciarono a scoprirne anche altre (i mesoni K , il barione Λ , ... un vero zoo). Una spiegazione di questi fenomeni, venne ottenuta negli anni successivi grazie alla formulazione della teoria dei **quark**. Secondo questa teoria il protone ed il neutrone sono in realtà particelle composte, formate dall'unione di tre oggetti più fondamentali, e dotati di carica elettrica frazionaria: i quark. Il protone è formato da due quark di tipo up, con carica elettrica $+2/3$, ed un quark di tipo down, con carica elettrica $-1/3$ (in questo modo la carica complessiva è $+1$). Il neutrone invece è formato da due quark di tipo down ed un quark di tipo up (con carica elettrica totale nulla). Accanto ai quarks up e down che formano la materia ordinaria, esistono altri sapori di quark di massa maggiore come il quark strano e quello con charm. I quark hanno la sorprendente proprietà di non potere essere separati, e si manifestano solo combinandosi in tre per particella (come nei protoni e neutroni) oppure in combinazioni di un quark ed un anti-quark⁹.

⁹Questo fenomeno del confinamento dei quarks è sorprendente, e può sembrare impossibile, ma è verificato

I pioni sono le particelle create più facilmente nelle interazioni nucleari perché sono le combinazioni più stabili di quark/anti-quark formate dai due quark più leggeri up e down (il π^+ è la particella $u\bar{d}$, il π^- quella $d\bar{u}$, mentre il π^0 è una miscela di $u\bar{u}$ e $d\bar{d}$), e vengono creati facilmente, come le scintille delle interazioni nucleari.

I raggi cosmici sono stati la prima sorgente di particelle di alta energia, e per molto tempo, oltre due decenni, gli studi sperimentali sulla fisica delle particelle si sono basati sulla loro osservazione. A partire dagli anni '50 però i fisici impararono a costruire degli acceleratori, delle macchine capaci di produrre fasci di particelle di alta energia, e divenne possibile ed anzi preferibile svolgere gli esperimenti utilizzando questi fasci in condizioni più favorevoli e controllate, e la fisica sperimentale delle particelle si trasferì dai palloni e dagli osservatori di alta quota a laboratori come quelli di Frascati o del CERN. Le interazioni tra fisica dei raggi cosmici e fisica delle particelle continuano però ad essere intense e molteplici. Da una parte gli esperimenti agli acceleratori permettono di studiare in dettaglio, ed utilizzando condizioni iniziali esattamente conosciute, le proprietà delle interazioni delle particelle, e questi risultati sono preziosi per interpretare le osservazioni dei raggi cosmici, dall'altra va anche notato che lo spettro di energia dei raggi cosmici si estende fino ad energie molto più elevate di quelle finora ottenute negli acceleratori¹⁰.

sperimentalmente in modo molto solido. Immaginate di prendere da una parte due quark di un protone e dall'altra il terzo quark, e di tirare il più possibile per separarli. Ad un certo punto, l'energia utilizzata per separare le due parti si converte in una coppia quark/anti-quark, e il sistema si ricombina a formare un barione con tre quarks, ed un mesone composto da un quark ed un anti-quark. La separazione è fallita.

¹⁰Al CERN di Ginevra le energie più elevate ottenute sono di 6.5 TeV (1 TeV = 10^{12} eV), molti ordini di grandezza più piccola di quelle dei raggi cosmici. La variabile rilevante per le interazioni è però l'energia nel centro di massa delle collisioni. Al CERN, dove due fasci di protoni vengono fatti scontrare uno contro l'altro questa energia arriva a 13 TeV (il doppio dell'energia di un singolo fascio) mentre per i raggi cosmici le interazioni possono arrivare (anche se solo in rari casi) ad oltre 400 TeV.

Telescopi per Raggi Cosmici

Palloni e Satelliti

Le particelle dei raggi cosmici primari interagiscono nell'atmosfera ad una quota media di 15–20 km sul livello del mare, e dunque per osservarle direttamente è necessario portare dei rivelatori a grande altezza. Questo è diventato possibile a partire dagli anni '50 del ventesimo secolo con lo sviluppo di palloni capaci di raggiungere la stratosfera e rimanere per molte ore ad una quota di circa 30 chilometri. La tecnica dei palloni ha continuato a svilupparsi e oggi sono possibili voli anche molto più lunghi di oltre cento giorni. Con l'avvento dell'era spaziale è poi diventato possibile mettere degli strumenti in orbita intorno alla Terra come satelliti indipendenti, o più recentemente a bordo della International Space Station.



Figura 7: Telescopio per raggi cosmici PAMELA.

Uno sviluppo molto importante è stato quello di riuscire a mettere in orbita dei rivelatori con campo magnetico, perché questo permette di misurare il segno della carica delle particelle. Questa separazione è particolarmente importante per identificare e studiare la presenza di antimateria (anti-elettroni, anti-protoni ed anti-nuclei) nei raggi cosmici. Il primo di questi rivelatori magnetici è stato il satellite PAMELA (progettato e costruito da una collaborazione internazionale con un ruolo fondamentale dell'Italia) lanciato nel 2006 e che ha operato per dieci anni [2]. Qualche tempo dopo, nel 2011 un altro rivelatore magnetico l'Alpha Magnetic Spectrometer (AMS) [3] è stato installato sulla ISS (Internatio-

nal Space Station), e sta ancora raccogliendo dati.



Figura 8: Telescopio per raggi cosmici AMS02, durante la sua installazione sulla International Space Station (ISS).

I rivelatori su pallone e su satellite osservano direttamente la particella primaria, e possono identificare la sua natura (protone, nucleo, elettrone, ...) e misurare la sua energia e direzione. Le misure hanno mostrato che la maggior parte dei raggi cosmici primari sono protoni, ma che circa il 10% delle particelle sono nuclei completamente ionizzati di diverso tipo. Tutti gli elementi sono presenti (elio, carbonio, ossigeno, ferro, ...) con diverse abbondanze che danno informazione sulle proprietà delle sorgenti.

Una studio di importanza fondamentale è quello di ricostruire la distribuzione (o spettro) di energia delle particelle primarie. Questo spettro ha una forma caratteristica di legge di potenza, vale a dire che il flusso di dipende dall'energia in modo proporzionale ad E^{-p} , dove l'esponente p (in un ampio intervallo di E) ha un valore di circa 2.7–2.8. Questo vuole dire che il flusso diminuisce molto rapidamente quando l'energia aumenta (di un fattore circa 500 per ogni decade). Capire quali meccanismi generano questa forma spettrale rimane uno dei problemi fondamentali per l'astrofisica dei raggi cosmici.

Gli elettroni rappresentano solo circa due centesimi del flusso delle particelle primarie, ed hanno uno spettro che decresce più rapidamente di quello dei protoni e dei nuclei, di nuovo con la forma di una legge di potenza, ma con un esponente più grande ($p \approx 3.0$ – 3.1). Questo è un

altro importante indizio per decifrare l'origine dei raggi cosmici.

Le osservazioni di PAMELA ed AMS che hanno generato più discussioni sono state quelle ottenute, con un dettaglio senza precedenti, dei flussi di particelle di anti-materia (positroni ed ed anti-protoni) nei raggi cosmici. Si tratta di contributi relativamente piccoli, meno di due particelle su mille sono positroni, e meno di una su diecimila è un antiprotone, ma è certamente di grande interesse capire dove e come queste anti-particelle sono prodotte¹¹. Una possibile sorgente di particelle di antimateria è la loro creazione nelle interazioni dei raggi cosmici più comuni con il gas interstellare, ma esistono anche altre possibilità.

La teoria più affascinante è che le anti-particelle nei raggi cosmici siano state generate dalla misteriosa materia oscura di cui conosciamo l'esistenza solo grazie ai suoi effetti gravitazionali. Alcune teorie, discusse intensamente da diversi anni, prevedono che la materia oscura presente nella nostra Galassia sia formata da un nuovo tipo di particelle con una massa centinaia o forse migliaia di volte quella del protone, che rimangono quasi invisibili perché hanno solo una piccola probabilità di interazione con la materia ordinaria. Queste particelle possono però annihilarsi tra di loro, oppure (in alcune varianti della teoria) disintegrarsi spontaneamente con una vita media molto lunga. Lo stato finale di queste reazioni è formato da uguali quantità di materia ed anti-materia, nella forma di particelle di alta energia, e molti lavori teorici suggeriscono la possibilità che una parte del flusso dei positroni (e forse anche degli anti-protoni) sia generato da questo meccanismo.

Un'altra possibilità interessante, anche questa oggetto di molti studi teorici, è che le anti-particelle siano create ed accelerate in sorgenti astrofisiche. Questo è molto più facile nel caso degli anti-elettroni, perché hanno una massa molto più piccola di quella degli anti-protoni, e quindi il costo in energia per creare una coppia (e^-e^+) è molto minore. Molti lavori hanno discusso la possibilità che nelle Pulsar (di cui

¹¹Al momento non è ancora stata osservata la presenza di anti-nuclei nei raggi cosmici, a parte la presenza di una manciata di possibili candidati da parte di AMS per i nuclei più leggeri (anti-deuterio ed anti-elio) che sono ancora da confermare.

parleremo brevemente nel seguito) si possano creare ed accelerare ad alta energia dei positroni.

L'origine della componente di antimateria nei raggi cosmici rimane un problema aperto, e oggetto di un'intensa discussione. Solo nuove osservazioni permetteranno di arrivare a delle conclusioni convincenti.

Le cascate atmosferiche estese

Le dimensioni geometriche dei telescopi per raggi cosmici che osservano direttamente le particelle primarie devono essere posizionati su un pallone sonda o su un satellite, e quindi non possono superare (almeno oggi) un'area di qualche metro quadrato. Questa limitazione non permette di osservare il flusso dei raggi cosmici di energia molto elevata. Questo perché il flusso decresce rapidamente con l'aumentare dell'energia, e diventa troppo piccolo. Ad esempio, il flusso per $E \gtrsim 3 \times 10^{15}$ eV è di circa 20 particelle per metro quadrato per anno, ed i più grandi rivelatori su satellite non riescono ad osservare che pochi eventi in tutta la loro vita. Per energie ancora maggiori il flusso diventa minuscolo, per $E \simeq 10^{19}$ eV si scende al livello di una particella per chilometro quadrato per anno.

Lo studio dei raggi cosmici ad alta energia rimane però possibile grazie all'osservazione degli sciame o cascate generate dalle particelle primarie in atmosfera. Le prime osservazioni di questi sciame vennero ottenute già negli anni '30, quando venne inventata la tecnica delle osservazioni in coincidenza. I primi esperimenti che utilizzavano questo metodo avevano posizionato i rivelatori di particelle uno sopra l'altro per osservare il passaggio della stessa particella attraverso due o più strumenti, ma è chiaramente possibile anche posizionare i rivelatori uno accanto all'altro, a distanza variabile, per vedere se le particelle arrivano isolate, oppure in gruppi. Esperimenti svolti alla fine degli anni '30 dal fisico francese Pierre Auger e dai suoi collaboratori ottennero dei risultati sorprendenti. Il tasso di coincidenza rimaneva elevato anche per rivelatori posizionati a centinaia di metri l'uno dall'altro. Questo è possibile se una singola particella primaria dei raggi cosmici è in grado di generare un grande numero (molti milioni in alcuni casi) di particelle secondarie che viaggiano insieme,

su traiettorie quasi parallele. Queste particelle, al livello del suolo, riempiono (con una distribuzione non uniforme, che decresce con la distanza dal centro) un disco con un raggio di dimensione variabile ma che può arrivare a essere di centinaia di metri (come osservato da Auger), o anche di diversi chilometri (come osservato oggi). Pierre Auger ed i suoi collaboratori, dimostrarono anche che la maggior parte delle particelle rivelate in coincidenza sono elettroni e positroni (accompagnati da un flusso di fotoni) e muoni (identificabili perché più penetranti, e capaci di attraversare lamine di piombo), e cercarono (con risultati in buona approssimazione corretti) di stimare l'energia della particella primaria, utilizzando ciò che era noto sulle interazioni, ed arrivarono alla conclusione che lo spettro dei raggi cosmici si doveva estendere fino ad energie veramente straordinarie, almeno fino a milioni di miliardi di elettron-Volt (10^{15} eV).

Questo insieme di particelle (tutte generate da un singolo primario) che si propagano insieme nell'atmosfera è paragonabile ad uno sciame di api che volano tutte nella stessa direzione, o alle gocce di uno scroscio d'acqua o di una cascata, ed i fisici lo chiamano *sciame atmosferico esteso* o *cascata atmosferica estesa*.

Il grande numero di particelle in uno sciame è dovuto al fatto che il numero cresce esponenzialmente quando inizia a svilupparsi, perché le particelle generate nella prima interazione (quella della particella primaria) possono interagire a loro volta e così di seguito, e penetrando nell'atmosfera lo sciame è formato da particelle sempre più numerose e di più bassa energia. Questo processo di moltiplicazione si arresta solo quando le particelle hanno un'energia sufficientemente bassa e vengono assorbite dall'aria depositando la loro energia come ionizzazione, e così il numero di particelle in uno sciame raggiunge un massimo e poi inizia a decrescere.

L'esistenza degli sciami atmosferici offre un attraente metodo per misurare le proprietà dei raggi cosmici di altissima energia con rivelatori al livello del suolo capaci di osservare questi sciami. Queste osservazioni hanno mostrato che lo spettro dei raggi cosmici si estende fino ad energie anche molto più grandi di quelle osservate da Auger. A queste energie altissime, che arrivano fino ad oltre 10^{20} eV il disco delle particelle

secondarie che arriva al suolo ha un raggio di alcuni chilometri. Questo permette di osservare uno sciame distribuendo dei rivelatori a grande distanza l'uno dall'altro, permettendo così di costruire un grande rivelatore con dei costi accettabili.

Il telescopio per raggi cosmici di energia più grande oggi in operazione si trova in Argentina, ed è chiamato Osservatorio Pierre Auger in onore del pioniere di cui abbiamo parlato, e vi lavorano i fisici di molti paesi di tutto il mondo, compresa l'Italia, che ha anzi avuto un ruolo di primo piano nel suo disegno e costruzione. (Una descrizione più approfondita dell'Osservatorio Pierre Auger è presentata dall'articolo di Sergio Petrer e Francesco Salamida in questo numero di Ithaca). L'osservatorio si estende su un'area di più di 3000 chilometri quadrati di pampa, dove sono distribuiti dei rivelatori di particelle ad una distanza di 1.5 chilometri l'uno dall'altro¹². Quando arriva uno sciame sufficientemente grande (e quindi generato da una particella primaria di energia sufficientemente elevata) un certo numero dei rivelatori registra un segnale proporzionale al numero di particelle che lo attraversano. I segnali generati dalle particelle di un singolo sciame nei diversi rivelatori sono quasi, ma non esattamente simultanei, questo perché le particelle secondarie arrivano al suolo come un disco dello spessore di qualche metro che si muove alla velocità della luce, così che le differenze nei tempi di arrivo in diversi punti permette di ricostruire l'orientamento del disco, e quindi la direzione del raggio cosmico primario. I segnali di tutti i rivelatori colpiti dallo sciame vengono inviati ad un computer di presa dati che li combina, per ricostruire direzione, energia, e (sia pure con qualche incertezza) il tipo di particella del primario che ha generato lo sciame.

L'Osservatorio Pierre Auger utilizza anche un altro ingegnoso metodo per misurare gli sciami dei raggi cosmici di altissima energia, quello della luce di fluorescenza. Quando particelle cariche relativistiche si propagano nell'atmosfera, queste possono non solo ionizzare gli atomi del mezzo, ma anche depositare energia nelle molecole dell'aria eccitando i loro involu-

¹²In un'area più ristretta i rivelatori sono più vicini, per permettere lo studio anche del flusso di particelle ad energia minore che generano sciami più piccoli

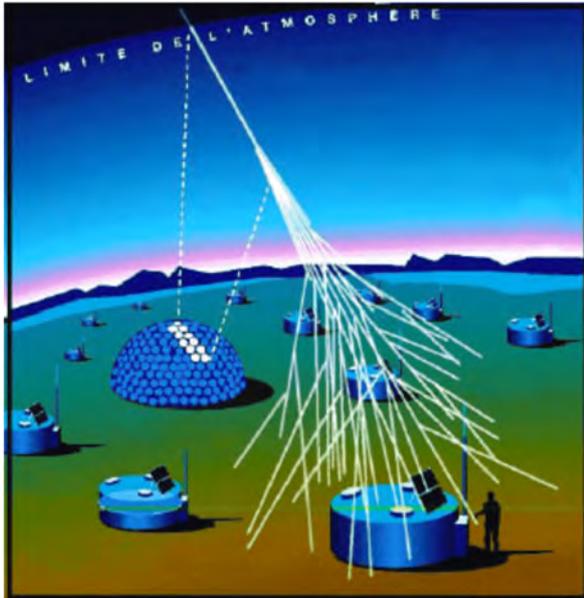


Figura 9: Schema del Pierre Auger Observatory in Argentina.

cri di elettroni. Le molecole eccitate ritornano quasi istantaneamente nello loro stato normale (o fondamentale) emettendo quella che viene chiamata luce di fluorescenza. Il passaggio nell'atmosfera di uno sciame di alta energia visto da lontano appare dunque come un sorgente di luce che si muove di moto rettilineo nel cielo alla velocità della luce. La sorgente prima cresce in brillantezza, mentre il numero di particelle aumenta esponenzialmente, raggiunge un massimo ed inizia poi ad affievolirsi. Un macchina da presa cinematografica che guarda verso il cielo (anzi meglio due o più di due per avere una visione stereoscopica) può filmare questi lampi di luce che attraversano il cielo, e lo studio delle immagini permette di nuovo di ricostruire direzione, energia e identità delle particelle primarie. Questa tecnica ingegnosa è possibile solo nelle notti senza luna (e senza nuvole che nasconderebbero i lampi generati dagli sciami) quando lo sfondo del cielo è sufficientemente scuro, ma nonostante questa limitazione è di grandissima utilità, ed ha permesso di ottenere misure molto importanti. L'Osservatorio Pierre Auger è considerato un telescopio per raggi cosmici ibrido, perché può utilizzare simultaneamente le due tecniche (dei rivelatori di superficie e della luce di fluorescenza) e questo è molto utile per limitare errori sistematici e migliorare la qualità delle misure.

La ricostruzione dell'energia, ed ancor più dell'identità delle particelle primarie a partire dalle osservazioni indirette degli sciami atmosferici richiede di avere una descrizione completa e dettagliata dello sviluppo di questi sciami, che è determinato dalle proprietà delle interazioni di alta energia. L'intima relazione tra l'astrofisica dei raggi cosmici e la fisica delle particelle elementari, continua quindi ad essere molto importante. Le conoscenze sono fluite e continuano a fluire in tutte e due le direzioni. Per alcune decadi la fisica sperimentale delle interazioni ad alta energia è stata possibile solo grazie ai raggi cosmici. Poi la costruzione di acceleratori di particelle ha permesso di studiare in laboratorio le interazioni di alta energia con grande precisione, e quindi di sviluppare modelli più accurati per lo sviluppo degli sciami atmosferici poi utilizzati per interpretare i dati dei telescopi per raggi cosmici. Le particelle di energia più elevata mai osservate sono però ancora quelle generate dalla Natura che ci arrivano dal cielo.

L'origine dei raggi cosmici

Se i fisici sono riusciti a fare rapidi progressi nel comprendere la natura dei raggi cosmici, e a ricostruire in buona approssimazione il loro spettro di energia, il problema della loro origine è rimasto a lungo senza soluzione, ed ancora oggi molte domande non hanno una risposta certa.

Il problema dell'origine dei raggi cosmici è così difficile perché le loro traiettorie durante la propagazione dalla sorgente alla Terra sono incurvate dai campi magnetici. La direzione con cui una particella è osservata non dice nulla sul punto del cielo dove si trova la sorgente che la ha emessa.

La situazione è opposta a quella della luce (o più in generale con i fotoni di tutte le lunghezze d'onda). Quando guardiamo il cielo questo ci appare puntellato di stelle, galassie ed altri oggetti astrofisici. Questo è perché la luce (o meglio i fotoni, che hanno carica elettrica nulla, e dunque non sono sensibili ai campi magnetici) si muove in linea retta. La distribuzione angolare dei fotoni forma dunque un'immagine con la posizione delle sorgenti sulla sfera celeste. L'immagine del cielo ottenuta con i raggi cosmici è invece quasi perfettamente uniforme, ed il numero di particel-

le che arriva alla Terra da ogni punto della sfera celeste è quasi esattamente uguale¹³.

Le prime teorie sui raggi cosmici, quando ancora si pensava che la radiazione primaria fosse formata da particelle neutre, interpretavano l'isotropia dei raggi cosmici come evidenza del fatto che fossero prodotti uniformemente in tutto lo spazio, e dunque di natura extragalattica o cosmologica, e queste idee sono riflesse nel nome. Ma una volta dimostrato che le particelle primarie sono cariche, l'isotropia può essere spiegata come la conseguenza dell'effetto dei campi magnetici che rimescolano le direzioni delle particelle, e diverse interpretazioni diventano possibili.

Alcuni fisici, ad esempio Walter Baade e Fritz Zwicky continuarono a pensare che i raggi cosmici avessero un'origine extragalattica e riempissero uniformemente tutto l'universo. Questa ipotesi richiede l'esistenza di una sorgente straordinariamente potente per riuscire a generare una tale gigantesca quantità di energia sotto forma di particelle relativistiche. Baade e Zwicky fecero allora una proposta ardita.

Gli astronomi conoscevano da diversi secoli il raro fenomeno dell'apparizione nel cielo di una nuova stella (in latino *Stella Nova* o più in breve di una *Nova*), che rimaneva visibile per qualche giorno o qualche settimana, per poi spegnersi lentamente. I due fisici, nel 1929, si resero conto che esistevano due classi di Novae di tipo completamente diverso, e in una delle classi le esplosioni, a cui diedero il nome di *Supernovae*, erano enormemente più luminose¹⁴. Baade

¹³Alle energie più basse ci sono anisotropie generate dal campo magnetico terrestre, discusse in precedenza e che hanno rivelato il fatto che i raggi cosmici hanno carica elettrica positiva. Gli effetti del campo geomagnetico (che sono comunque calcolabili) diminuiscono velocemente con la rigidità magnetica delle particelle, e le anisotropie rimangono dell'ordine di una parte per mille, fino ad $E \simeq 10^{18}$ eV, e anche alle energie più elevate rimangono sotto il 10%.

¹⁴Oggi il termine *Nova* è usato dagli astronomi per indicare solo la classe dei transienti meno luminosi. Si tratta di esplosioni che avvengono sulla superficie di stelle del tipo nana bianca che sono in un sistema binario "stretto" con una seconda stella di tipo gigante rossa relativamente vicina. In questi sistemi, la nana bianca, grazie alla forza di gravità, sottrae materia alla stella compagna. Il materiale si accumula sulla sua superficie, e quando raggiunge una massa critica si può innescare una reazione di fusione nucleare che libera rapidamente energia e genera il lampo osservabile dalla Terra. Queste esplosioni possono ripetersi molte volte, e si conoscono infatti

e Zwicky fecero la speculazione (che si è poi rivelata corretta) che le Supernovae fossero dovute al collasso gravitazionale di una stella ed alla formazione di una stella di neutroni. Al centro delle stelle sufficientemente massicce, alla fine della loro vita, si forma un nocciolo di ferro che cresce grazie alle reazioni di fusione nucleare. Quando il nocciolo supera una massa critica (del valore di circa 1.4 masse solari, nota come massa di Chandrasekhar, il nome del fisico indiano che ha compreso per primo la sua esistenza) inizia a collassare sotto il suo stesso peso. Quando la materia del nocciolo raggiunge e supera la densità nucleare (cioè quando il suo raggio si è contratto da 5000 chilometri a circa 10), la sua compressione genera un gigantesco rimbalzo, un'onda d'urto che si propaga verso l'esterno, lanciando nello spazio alla velocità di migliaia di chilometri al secondo gli strati esterni della stella. Questi eventi straordinari hanno avuto per noi un'importanza letteralmente vitale, perché la materia della stella lanciata nello spazio interstellare dall'esplosione è formata non solo da idrogeno ed elio (che costituiscono la quasi totalità della materia primigenia che emerge dal Big Bang) ma contiene anche tutti gli altri elementi (carbonio, ossigeno, ferro . . .) che sono stati sintetizzati dalle reazioni di fusione nucleare all'interno della stella, e che poi formano la nostra Terra, ed i nostri stessi corpi¹⁵. I frammenti della stella esplosa si disperdono nello spazio ma dopo essersi mescolati con il resto del gas interstellare possono poi ricondensarsi per formare nuovi sistemi stellari, simili a quello solare con i suoi pianeti e la nostra Terra. La conclusione è che la materia che forma la Terra ed i nostri corpi si deve essere trasformata nel centro di una (o forse più di una) stella, che è poi violentemente esplosa alla fine della sua vita. Siamo letteralmente "polvere di stelle".

diverse *Novae ricorrenti*. Al contrario, le *Supernovae* sono esplosioni molto più potenti che distruggono completamente un'intera stella, e che quindi non si possono ripetere.

¹⁵Per maggiore completezza, nei noccioli interni delle stelle vengono formati gli elementi fino al ferro, in reazioni di fusione nucleare che rilasciano energia. Gli elementi più pesanti sono formati in processi di nucleosintesi esplosiva quando i nuclei (già formati nel centro delle stelle) sono bombardati da flussi di neutroni, che avvengono in parte nelle Supernovae ed in parte nelle coalescenze di stelle compatte che verranno discusse in seguito.

Baade e Zwicky osservarono che l'energia rilasciata durante la formazione di una stella di neutroni durante il collasso gravitazionale, secondo i loro calcoli, era molto più grande di quella visibile nella forma di energia cinetica dei frammenti lanciati nello spazio, ed ipotizzarono che l'energia mancante venisse emessa (con un meccanismo sconosciuto) nella forma di raggi cosmici. Le Supernovae sono molto rare (un paio per Galassia per secolo), ma sono così energetiche che sommando i contributi di tutte le esplosioni durante la storia dell'Universo a partire dal Big Bang, diventa possibile riempire uniformemente di particelle relativistiche l'intero Universo.

Oggi sappiamo che le considerazioni di Baade e Zwicky sull'origine delle *Supernovae* da collasso gravitazionale sono corrette, ma anche che la maggior parte dell'energia rilasciata in un collasso gravitazionale viene emessa non come raggi cosmici ma sotto forma di neutrini in un lampo della durata di una decina di secondi. Questa non è solo un'ipotesi teorica, perché ha ricevuto una spettacolare conferma sperimentale con l'osservazione dell'emissione di neutrini dalla supernova SN1987A esplosa il 23 febbraio del 1987 nella Grande Nube di Magellano (una galassia satellite della Via Lattea). La massima energia disponibile per generare raggi cosmici dalle *Supernovae* è quindi migliaia di volte più piccola di quella ipotizzata da Baade e Zwicky, ma come discuteremo tra poco, oggi sappiamo che i raggi cosmici non riempiono uniformemente l'Universo, e dunque richiedono una sorgente meno potente. Perciò è possibile, ed è anzi l'ipotesi considerata oggi più probabile, che le *Supernovae* siano in effetti la principale sorgente di raggi cosmici.

Nel 1949 tre fisici Hannes Alfvén, Robert Richtmyer ed Edward Teller formularono un'ipotesi completamente diversa, quasi opposta a quella di Baade e Zwicky, e cioè che i raggi cosmici hanno un'origine locale, sono generati dal Sole e confinati ad una regione intorno al sistema solare. Questa idea nasceva dagli studi di Alfvén che aveva capito che lo spazio interplanetario non è vuoto, ma contiene un gas rarefatto in parte in forma di plasma, dove possono esistere correnti elettriche che generano un campo magnetico caotico, sufficiente a rimescolare ed isotropizzare le traiettorie di particelle cariche.

Nello stesso anno uscì un importantissimo e

oggi celebrato articolo di Enrico Fermi, in cui veniva fatta l'ipotesi in un certo senso intermedia, e cioè che i raggi cosmici osservati alla Terra fanno parte di una popolazione di particelle che riempie la nostra Galassia, mentre lo spazio intergalattico ne conterrebbe una densità molto più piccola. Il confinamento delle particelle cariche nella Galassia sarebbe dovuto ai campi magnetici generati dalle correnti elettriche che attraversano il sottile plasma che riempie il mezzo interstellare. Questa ipotesi, come vedremo in seguito, ha avuto poi una chiara conferma sperimentale. Il confinamento dei raggi cosmici però non può essere permanente, in parte perché la bottiglia magnetica non è perfettamente ermetica, e poi perché ad ogni modo le particelle possono interagire con il gas interstellare, e se non fuggono nello spazio extragalattico verrebbero comunque assorbite da queste interazioni dopo avere viaggiato per un tempo dell'ordine di 10–100 milioni di anni. Questo tempo può sembrare lungo ma è invece corto rispetto alla vita della Galassia, e dunque i raggi cosmici devono essere continuamente rinnovati da sorgenti nella nostra Galassia. Fermi si pose quindi il problema di quale potesse essere il meccanismo capace di accelerare delle particelle ad altissime energie, e nel suo lavoro propose un metodo noto oggi come accelerazione di Fermi, che, anche se in una forma modificata, è ancora oggi una base fondamentale per le teorie sull'origine dei raggi cosmici.

Abbiamo visto come un elemento fondamentale nelle idee di Fermi (introdotto già da Hannes Alfvén) è che lo spazio interstellare contiene un gas rarefatto dove delle correnti elettriche generano un campo magnetico disordinato che curva e rimescola le traiettorie delle particelle cariche. Ora Fermi ipotizzò anche che il gas interstellare non è in quiete, ma è formato da nuvole che si muovono nello spazio in diverse direzioni. Ora, per un osservatore che vede una nuvola magnetizzata muoversi con velocità non nulla, il campo magnetico appare nel suo sistema di riferimento come un campo elettrico, che è dunque capace di accelerare (o anche decelerare) particelle dotate di carica elettrica. Un semplice calcolo mostra che in media l'incontro di una particella carica con una nuvola aumenta la sua velocità¹⁶, e che

¹⁶Come analogia, si può immaginare di lanciare una palla

ripetuti incontri con queste nuvole magnetizzate possono fornire ad una particella energie anche elevatissime, perché la sua energia cresce esponenzialmente, ed un oggetto macroscopico come una nuvola di gas possiede una energia enorme (praticamente infinita) rispetto ad una singola particella.

Fermi ipotizzò dunque che i raggi cosmici sono accelerati continuamente e gradualmente durante la propagazione nella Galassia da questo meccanismo associato ai movimenti del plasma del mezzo interstellare. L'accelerazione è anche bilanciata da perdite (Fermi ipotizzò come meccanismo dominante l'assorbimento per interazioni con il gas interstellare, ma più in generale si deve considerare anche la fuga dal confinamento). Dall'equilibrio tra accelerazione e perdite emerge uno spettro dei raggi cosmici in buona approssimazione costante (o più precisamente stazionario) della forma di legge di potenza osservata sperimentalmente.

Oggi sappiamo che molte cose nella proposta di Fermi non funzionano, ma alcune delle sue idee rimangono di importanza fondamentale. La principale differenza tra la proposta originale del 1949 di Fermi e le teorie discusse oggi, è che si pensa che i raggi cosmici siano accelerati non da un meccanismo diffuso in tutta la Galassia, ma in sorgenti astrofisiche ben definite nello spazio ed anche nel tempo. Il meccanismo di accelerazione è uno sviluppo di quello proposto da Fermi, nel senso che le particelle ricevono sempre la loro energia interagendo con un plasma magnetizzato in movimento, ma questo avviene all'interno di certi sistemi (o meglio eventi) astrofisici.

Nelle *Supernovae* l'esplosione della stella è generata da un'onda d'urto sferica che parte dal nocciolo della stella progenitrice, compresso a densità nucleare, ne attraversa gli strati più esterni e si propaga nello spazio circumstellare con una velocità iniziale di oltre diecimila chilometri al secondo, trascinandosi dietro la materia della stella. Secondo la teoria (che è considerata come ben motivata, ma che ancora non ha una conferma osservativa indiscutibile) particelle con carica elettrica possono essere accelerate

nella pista di autoscontro di un luna park. Ripetuti scontri con le automobili in moto sulla pista accelerano gradualmente la palla a velocità sempre più alte, fino a che la palla non vola fuori dalla pista, o raggiunge la stessa energia cinetica media delle automobili.

dai campi elettromagnetici trasportati dal plasma, ed aumentare gradualmente la loro energia ricevendo una spinta ogni volta che attraversano l'onda d'urto in espansione. Questo meccanismo è conosciuto in inglese come *Fermi diffusive shock acceleration* che possiamo tradurre come accelerazione diffusiva di Fermi in presenza di onde d'urto.

Due argomenti teorici danno supporto all'idea che la maggior parte dei raggi cosmici sia generata nelle esplosioni di *Supernova*. Il primo è basato su considerazioni di bilancio energetico. Sappiamo (sia pure con un'incertezza non trascurabile) che i raggi cosmici possono rimanere confinati nella Galassia per un tempo dell'ordine di alcune decine di milioni di anni. Usando questa stima, la densità osservata dei raggi cosmici alla Terra (che estrapoliamo anche ad altri punti della nostra Galassia) ed il volume della Via Lattea, è possibile stimare quale è la luminosità dell'insieme delle sorgenti necessaria a rigenerare le particelle dei raggi cosmici. Il risultato, espresso in luminosità solari e dell'ordine di circa dieci milioni di soli (che però emettono energia non come luce visibile, ma come particelle cariche relativistiche). Non è facile trovare (o immaginare) una sorgente astrofisica così potente, ma le esplosioni di *Supernova* sono una possibilità. L'energia cinetica dei frammenti di stella lanciati nello spazio è infatti grandissima (dieci masse solari lanciate alla velocità di alcune migliaia di chilometri al secondo corrispondono a circa 10^{51} erg). Gli eventi di *Supernova* nella nostra Galassia sono molto rari, circa una o due per secolo, ma se una frazione dell'ordine del 10% dell'energia cinetica dell'esplosione viene trasformata in raggi cosmici, il totale corrisponde proprio (in approssimazione ragionevolmente buona) a quello richiesto.

Il secondo argomento teorico è invece di dinamica dell'accelerazione, ed è basato sul fatto che calcoli teorici sull'accelerazione di raggi cosmici nelle *Supernovae* basati sul meccanismo di Fermi predicono una distribuzione di energia che ha la forma di una legge di potenza, con un esponente che, dopo avere considerato gli effetti di propagazione nella Galassia, è consistente con quello osservato.

È chiaramente possibile immaginare l'esistenza di altre sorgenti di raggi cosmici che non siano

le *Supernovae*, e le idee generali dell'accelerazione diffusiva di Fermi possono essere applicate anche ad altri eventi astrofisici, in particolare a quelli esplosivi dove grandi masse sono violentemente messe in movimento. Diverse recenti osservazioni hanno in effetti dimostrato che l'accelerazione di particelle cariche ad energie relativistiche è un fenomeno che avviene in diverse classi di oggetti astrofisici.

L'Astrofisica "multi-messaggeri"

Come è possibile identificare una sorgente di raggi cosmici visto che le particelle che osserviamo qui sulla Terra arrivano con una direzione che non dice nulla sulla loro origine? Determinare la presenza di una popolazione di particelle relativistiche in una regione lontana dello spazio è possibile grazie al fatto che una frazione forse piccola, ma comunque non nulla, di queste particelle interagirà con la materia o con i campi di radiazione presenti nello spazio, e da queste interazioni emergono secondari neutri: fotoni e neutrini che si propagano in linea retta, e possono essere osservati in telescopi sulla Terra, formando un'immagine della sorgente.

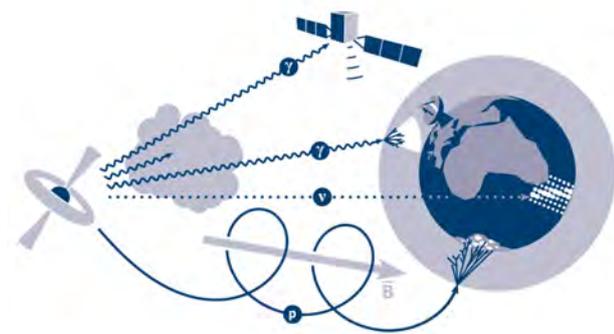


Figura 10: Il concetto dell'astronomia multimessaggera. Una sorgente emette raggi cosmici, raggi gamma e neutrini.

È facile descrivere queste emissioni di fotoni e neutrini perché i processi sono essenzialmente gli stessi che generano la radiazione secondaria a partire dalle interazioni dei raggi cosmici con l'atmosfera della Terra. Le interazioni di protoni e neutroni generano un grande numero di pioni (le particelle π^+ , π^- e π^0 formate dalle combinazioni $q\bar{q}$ dei due quark più leggeri up e down). I pioni si disintegrano spontaneamente in un

tempo molto breve. Il decadimento di un pione neutro crea due fotoni di alta energia, mentre il decadimento di un pione carico, crea tre neutrini, uno creato direttamente insieme ad un muone, e due dal decadimento a catena di questo muone¹⁷. Il risultato è che una popolazione di protoni e nuclei di alta energia presenti in un acceleratore astrofisico, genera flussi di fotoni e neutrini, approssimativamente di uguale intensità, proporzionali sia al numero di particelle presenti che alla densità del mezzo in cui si propagano.

Se nella sorgente sono presenti elettroni (o positroni) relativistici, esistono anche altri meccanismi di emissione di fotoni (ma non di neutrini). Un meccanismo è quello chiamato radiazione di sincrotrone dovuto al fatto che le particelle con carica elettrica sono deviate dalla presenza di campi magnetici, e l'accelerazione di una carica è sempre accompagnato dalla radiazione elettromagnetica¹⁸. Un secondo meccanismo di emissione è quello dell'effetto Compton inverso (dal nome del fisico americano Arthur Compton) cioè la collisione elastica tra elettroni e fotoni. In queste collisioni elettroni relativistici possono cedere la loro energia a fotoni di bassa energia, come quelli ottici o della radiazione di fondo cosmico di 2.7 Kelvin (il residuo del Big Bang) e generare raggi gamma¹⁹.

L'osservazione di raggi gamma (e più in generale di fotoni in diverse regioni dello spettro) e di neutrini permette di determinare in quali regioni dello spazio sono presenti particelle cariche di alta energia (cioè raggi cosmici), e se si conoscono sufficientemente bene le proprietà del sito di emissione (che determinano il bersaglio delle interazioni) e dello spazio tra la sorgente e la Terra

¹⁷Una buona parte dei μ^\pm creati nell'atmosfera della Terra arriva fino al suolo (formando una parte importante della radiazione cosmica secondaria), e le particelle decadono da ferme dopo avere perso tutta la loro energia cinetica in ionizzazione del suolo. In un ambiente astrofisico, la densità è in genere molto piccola, ed i muoni decadono prima di avere perso una quantità apprezzabile di energia.

¹⁸La potenza della radiazione emessa è proporzionale al quadrato dell'accelerazione. Per la stessa forza dunque l'accelerazione è molto più grande per elettroni che per protoni, perché la loro massa è circa duemila volte più piccola. La radiazione di sincrotrone è dunque importante solo per elettroni e positroni.

¹⁹Anche in questo caso la probabilità di interazione dipende dalla massa della particella carica, ed è significativa solo per particelle leggere come elettroni e positroni.

(dove è possibile che il flusso di fotoni –ma non di neutrini – sia parzialmente assorbito) diventa possibile ricostruire l'entità e la distribuzione di energia di queste popolazioni di raggi cosmici. Per questo motivo sono stati disegnati e costruiti speciali telescopi sia per raggi gamma che per neutrini.

Da queste considerazioni emerge che per conoscere le proprietà delle sorgenti di alta energia è utile, anzi necessario, combinare osservazioni che utilizzano tre diversi tipi di particelle, tre diversi *messaggeri*: raggi cosmici, fotoni e neutrini.

Esiste anche un quarto tipo di messaggero che può essere di fondamentale importanza nello studio delle sorgenti di alta energia: le onde gravitazionali. Queste onde sono una delle più importanti predizioni della teoria della Relatività Generale di Albert Einstein, uno dei pilastri fondamentali della fisica moderna. Questa teoria è stata riassunta da John Wheeler in due brevi frasi:

“La materia dice allo spazio-tempo come curvarsi. Lo spazio-tempo dice alla materia come muoversi”.

Come scoperto da Galileo osservando la caduta di oggetti dalla cima della torre di Pisa, corpi diversi si muovono sotto l'effetto della gravità con identica accelerazione. Nella teoria di Einstein questo si spiega con il fatto che la materia si muove in un campo gravitazionale lungo traiettorie, le geodesiche, determinate unicamente dalla curvatura dello spazio-tempo²⁰. La curvatura dello spazio-tempo è determinata non semplicemente dalla massa (come nella teoria della gravità di Newton) ma dalla massa e dal suo movimento (o più tecnicamente dal tensore energia-impulso).

Le onde gravitazionali emergono perché quando una massa accelera, genera una increspatura nello spazio tempo che si propaga alla velocità della luce, un modo analogo alle onde circolari

²⁰La geodesica è la generalizzazione in uno spazio curvo del concetto di linea retta. Ad esempio le geodesiche su una sfera sono gli archi di cerchio massimo. È interessante notare come la separazione tra due punti che si muovono a velocità costante lungo due differenti archi non varia nel tempo in modo costante, ma accelera. La curvatura dunque può apparire come una forza attrattiva.

sulla superficie dell'acqua che partono dal punto dove abbiamo gettato un sasso. L'effetto è straordinariamente piccolo, ed è impossibile generare onde gravitazionali osservabili in esperimenti di laboratorio. Esistono però eventi astrofisici (ne discuteremo alcuni tra breve) dove grandissime masse hanno elevatissime accelerazioni, arrivando rapidamente a velocità vicine a quella della luce. Questi eventi, che anche se avvengono a distanze enormi dalla Terra, possono generare effetti, che sebbene minutissimi sono osservabili in speciali antenne costruite a questo scopo. L'osservazione delle onde gravitazionali è stata finalmente ottenuta da pochi anni, e per questa scoperta il premio Nobel per la fisica del 2017 è stato assegnato a Rainer Weiss, Barry Barish e Kip Thorne.

La relazione tra le onde gravitazionali e le emissioni di alta energia (nella forma di raggi cosmici, fotoni e neutrini) può essere compresa in modo semplice. L'accelerazione di particelle cariche ad energie relativistiche richiede la presenza di campi elettrici sufficientemente elevati. Questi campi elettrici si formano quando della materia si muove ad alta velocità. Abbiamo discusso del caso delle esplosioni di *Supernova*, dove l'involucro esterno della stella viene violentemente accelerato dall'onda d'urto di rimbalzo nella formazione di una stella di neutroni, ma esistono anche altri casi²¹. Una condizione qualitativa ma generale delle condizioni per le quali si generano particelle di alta energia si può riconoscere nell'aggettivo *violento*: grandi masse acquistano violentemente grandi velocità, e quindi subiscono grandi accelerazioni. Ma grandi masse e grandi accelerazioni sono esattamente le condizioni che portano all'emissione di onde gravitazionali.

Sulla base di queste considerazioni ci si può dunque attendere di osservare delle coincidenze, ovvero che ad una parte degli eventi che generano onde gravitazionali sia associata l'emissione di particelle (raggi cosmici, fotoni e neutrini) di alta energia, e viceversa che almeno alcune

²¹È da notare che stiamo parlando di due accelerazioni di tipo diverso. Nel caso delle *Supernovae* l'intera massa degli strati esterni della stella è accelerata fino ad una velocità di migliaia di chilometri al secondo. Il plasma in movimento può in seguito accelerare una (relativamente piccola) parte delle particelle fino ad velocità vicine a quella della luce.

delle sorgenti di alta energia siano associate ad eventi nei quali sono emesse onde gravitazionali. Questa è la base della **Astronomia a multi-messaggeri**, che studia quello che possiamo chiamare l'Universo delle Alte Energie. Questa nuova astronomia ha cominciato a fare i suoi primi passi con le prime osservazioni che mettono insieme neutrini e raggi gamma e, in uno spettacolare evento del 17 agosto del 2017, onde gravitazionali e raggi gamma.

Telescopi per raggi gamma

I fotoni di alta energia (o raggi gamma) sono assorbiti nell'aria dopo avere attraversato solo un piccolo spessore (circa il tre per cento dell'atmosfera), e dunque come per i raggi cosmici, la osservazione diretta richiede di posizionare il telescopio al di sopra dell'atmosfera. I primi telescopi per raggi gamma sono stati messi in orbita negli anni '60. Tra il 1991 ed il 2000 il satellite CGRO (Compton Gamma Ray Observatory) [4] con a bordo quattro differenti strumenti ha ottenuto risultati di grande interesse. Dal 2008 è in orbita il Fermi Gamma Ray Telescope [5] chiamato in questo modo per onorare Enrico Fermi ed i suoi studi sull'accelerazione delle particelle. Questo telescopio ha rivelato più di seimila differenti sorgenti di alta energia e fatto fare grandi progressi alla nostra comprensione dell'Universo delle Alte Energie.



Figura 11: Il telescopio per raggi gamma FERMI, lanciato in orbita l'11 giugno 2008.

I telescopi su satellite sono troppo piccoli per osservare i flussi di raggi gamma ad energie più grandi di circa 10^{12} eV, ma come per i raggi cosmici, per energie sufficientemente elevate diventa possibile misurare indirettamente i raggi gamma osservando gli sciami che generano nell'atmosfera. Risultati importanti sono stati ottenuti grazie

ai telescopi che utilizzano la tecnica della luce Čerenkov. Questa luce, chiamata con il nome del fisico (e premio Nobel) sovietico Pavel Čerenkov che l'ha scoperta nel 1934, è emessa in aria in un cono di angolo circa 1.4 gradi rispetto alla direzione della velocità da particelle relativistiche con velocità $v > 0.9997 c$. Gli sciami di raggi gamma in un ampio intervallo di energia sono assorbiti prima di arrivare a terra, ma al suolo arriva la luce Čerenkov emessa dalle particelle dello sciame sotto forma di un lampo che è osservabile (durante le notti senza luna e senza nuvole) da telescopi disegnati a questo scopo. Dalla forma, orientamento e luminosità dei lampi di luce Čerenkov è possibile selezionare sciami generati da raggi gamma (riducendo il fondo di sciami generati dalle particelle cariche dei raggi cosmici) e determinare direzione ed energia della particella primaria. La tecnica di osservazione dei telescopi Čerenkov si è raffinata nelle ultime decadi, costruendo telescopi con specchi più grandi al fine raccogliere più luce, fotocamere con maggiore risoluzione, e sviluppando il metodo stereoscopico dove uno stesso sciame è osservato da diversi telescopi, per ricostruire meglio le proprietà dei raggi gamma che li generano. Telescopi Čerenkov come HESS, MAGIC e VERITAS [6] hanno identificato alcune centinaia di sorgenti di raggi gamma.



Figura 12: Il telescopio Čerenkov MAGIC.

Ad energie ancora più elevate i raggi gamma possono essere osservati da rivelatori che osservano gli sciami estesi, come quello di LHAASO in Cina [7].



Figura 13: Il telescopio per raggi cosmici e raggi gamma LHAASO si trova in Cina alla quota di 4300 metri.

Telescopi per Neutrini

I neutrini interagiscono molto debolmente, e questo rende la loro osservazione molto difficile; d'altra parte questa loro proprietà li rende molto attraenti come messaggeri astrofisici perché possono emergere da luoghi che sono opachi all'emissione di fotoni. Tre esempi spettacolari sono:

1. I neutrini solari, generati dalle reazioni di fusione nucleare nel Sole.
2. I neutrini generati dalla Supernova SN1987A (del 23 febbraio 1987), che sono stati emessi in un lampo incredibilmente potente e della durata di solo una decina di secondi dall'interno della stella di neutroni appena formato dal collasso gravitazionale della stella progenitrice.
3. I neutrini geofisici emessi dalle sostanze radioattive all'interno della Terra.

Le tre classi di neutrini hanno energie dell'ordine di 1–10 MeV, e sono state osservate con rivelatori disegnati a questo scopo (e due premi Nobel sono stati assegnati per i neutrini solari e quelli della Supernova del 1987). L'osservazione dei neutrini associati all'Universo delle alte energie richiede rivelatori di diverso disegno, e di massa grandissima. Per fare questo è nata l'idea di allestire con rivelatori un chilometro cubo di acqua e di ghiaccio.

Il più grande rivelatore di neutrini esistente oggi al mondo è stato costruito al Polo Sud e si chiama IceCube. Il nome cubo di ghiaccio descrive perfettamente questo telescopio. Al polo

Sud si incontrano condizioni uniche. La superficie dell'Antartide è qui coperta da uno strato di ghiaccio dello spessore di due chilometri e mezzo. I fisici che hanno progettato e costruito IceCube [8] hanno distribuito nel ghiaccio circa cinquemila rivelatori di luce, alle profondità tra 1500 e 2500 metri²². Costruire un rivelatore di queste dimensioni al Polo Sud ha rappresentato uno sforzo straordinario, che però ha dato dei risultati affascinanti. Le osservazioni di IceCube hanno rivelato che esistono sorgenti extragalattiche che emettono neutrini con energie altissime (tra 10^{14} e 10^{17} eV).

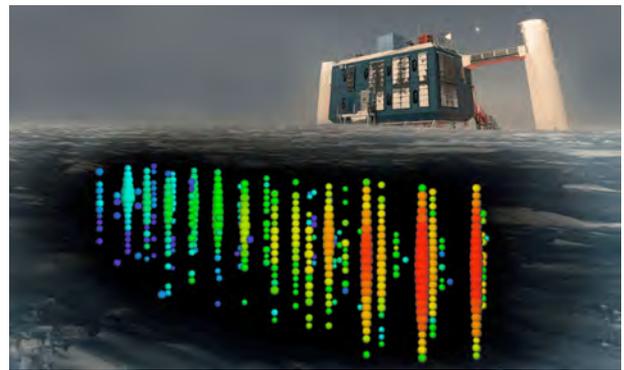


Figura 14: Il telescopio per neutrini IceCube al Polo Sud.

L'interesse per nuovi telescopi di neutrini è molto forte, ed esistono progetti sia per l'ampiammento di IceCube, sia per la costruzione di altri telescopi per neutrini, basati sulla stessa concezione, ma anche su altri principi. Un progetto sul quale fisici italiani stanno lavorando intensamente è la costruzione di un rivelatore (KM3NeT) di struttura simile ad IceCube ma nel profondo del mar Mediterraneo, vicino alle coste della Sicilia [9].

²²I rivelatori sono dentro sfere del diametro di circa 30 cm, attaccati lungo un cavo, come le perle di una collana, ad una distanza di circa quindici metri l'uno dall'altro. Per posizionarli nel ghiaccio, i fisici fanno un buco di due chilometri e mezzo, scavato utilizzando un getto di acqua calda. Il cavo (che serve a trasmettere i dati dei rivelatori) con le sue perle viene poi calato nel buco. Il ghiaccio in breve si riforma, ed i rivelatori sono per sempre imprigionati nel ghiaccio, ma i segnali che ricevono possono essere trasmessi attraverso il cavo ai computer di acquisizione dati, e rivelare le interazioni dei neutrini.

L'Universo delle Alte Energie

L'Astronomia multimessaggera è un campo in rapido sviluppo, e gli ultimi anni hanno visto molti nuovi risultati e molte sorprese. Una discussione dettagliata di questi sviluppi richiederebbe più spazio di quello che abbiamo a disposizione qui, e tra l'altro rischierebbe di essere presto in parte obsoleta, perché è molto probabile che nuove osservazioni costringeranno i fisici a rivedere le loro teorie (come è avvenuto molte volte nel passato in questo campo). Nel seguito ci limiteremo per questo solo ad alcune osservazioni generali.

I telescopi per raggi gamma hanno ottenuto risultati di un interesse che senza esitazioni si può chiamare straordinario. I raggi gamma sono generati dalle interazioni dei raggi cosmici e viaggiano in linea retta, quindi la loro distribuzione angolare forma una mappa che è la proiezione bidimensionale sulla sfera celeste dei siti dove sono presenti particelle di alta energia²³. I telescopi su satellite (AGILE e FERMI) hanno ottenuto delle mappe dell'intero cielo gamma. Queste mappe mostrano che il cielo visto in fotoni di alta energia ($E \gtrsim 10^8$ eV) è formato da diverse componenti. La prima è un flusso diffuso che segue la forma del disco della Galassia, con un massimo verso il suo centro. Questo flusso è generato dai raggi cosmici che interagiscono nello spazio interstellare della Galassia, e le osservazioni confermano l'idea che i raggi cosmici riempiono la Via Lattea, mentre la loro densità nello spazio extragalattico è molto inferiore. Una seconda componente è un insieme di sorgenti puntiformi o quasi-puntiformi, in parte Galattiche ed in parte extragalattiche che appartengono a diverse classi. Sullo sfondo esiste un flusso isotropo di raggi gamma, uguale da tutte le direzioni. Questo flusso è di natura extragalattica, e la sua isotropia riflette il fatto che l'Universo su scala abbastanza grande è omogeneo. Si pensa che questo flusso isotropo sia dovuto ad un insieme di sorgenti extragalattiche deboli e lontane e quindi non risolte e forse anche in parte dell'emissione dallo spazio extragalattico.

²³L'emissione di raggi gamma dipende anche dalle proprietà del mezzo dove si propagano i raggi cosmici (come densità del gas e campi di radiazione). E questo genera una incertezza nel ricostruire lo spettro e composizione dei raggi cosmici a partire dai flussi di gamma.

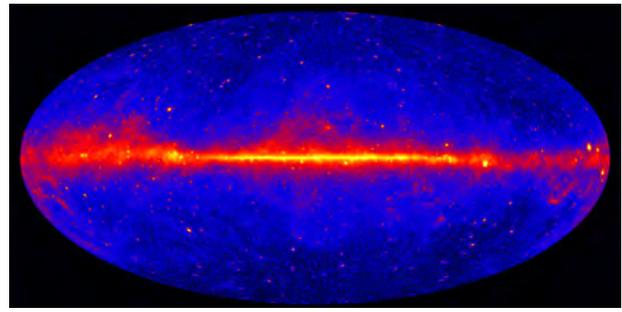


Figura 15: La sfera celeste è raffigurata sul piano (in una proiezione che conserva l'area). Il centro Galattico è al centro, ed il piano Galattico lungo la linea orizzontale che passa per il centro. Chiaramente visibile è il contributo dei raggi gamma emessi dalle interazioni dei raggi cosmici che interagiscono con il gas interstellare (che si concentra sul piano Galattico). Si possono anche intravedere molte sorgenti puntiformi.

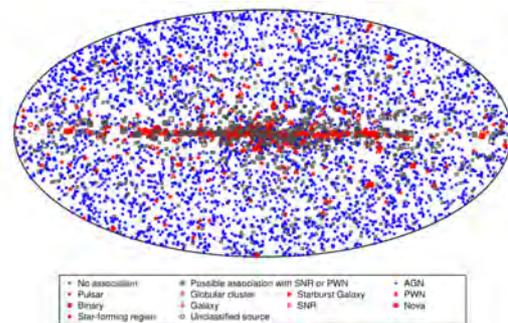


Figura 16: Sorgenti di raggi gamma rivelati dal telescopio FERMI. È evidente che esistono sia sorgenti Galattiche (presenti nel piano Galattico), e sorgenti extragalattiche (distribuite uniformemente sulla sfera celeste). Le sorgenti appartengono a diverse classi.

Una caratteristica di molte delle sorgenti gamma è la loro grande *variabilità*. Il flusso di molte sorgenti non è costante, ma varia nel tempo, con una struttura temporale in molti casi caotica, così che periodi di quiete si alternano a periodi dove la sorgente è luminosa (con intensità differenti, e per lunghezze di tempo differenti). In alcuni casi le variazioni sono molto rapide, e la luminosità può cambiare di molto in pochi minuti. Questa situazione è esattamente il contrario di come appare il cielo visto in luce ordinaria, dove le variazioni sono molto rare.

Alcune delle sorgenti più importanti ed affascinanti del cielo gamma, sono transienti molto rapidi, bagliori luminosissimi che però brillano nel cielo per un tempo brevissimo, di pochi secondi,

o anche solo di frazioni di secondo. Questi lampi di raggi gamma sono conosciuti in inglese come *Gamma Ray Bursts*.

“Supernova Remnants” e “Pulsars”

Molte delle sorgenti di raggi gamma nella nostra Galassia sono associate ai *Supernova Remnants* (Resti di Supernova), quelle sfere di gas in espansione che circondano il punto dove in un passato non troppo lontano è avvenuta la gigantesca esplosione di una stella.

Abbiamo discusso come gli astrofisici teorici hanno ipotizzato che la gran parte dei raggi cosmici siano accelerati dalle onde d’urto generate in queste esplosioni. Questo porta alla predizione che all’interno di Resti di Supernova giovani (con meno di qualche migliaio di anni) si debba trovare una gran quantità di raggi cosmici accelerati da poco (o che sono ancora in fase di accelerazione). La domanda è dunque: “questa predizione è effettivamente verificata oppure no?” La risposta si deve dare in due parti. La prima è che le osservazioni dimostrano che i Resti di Supernova giovani emettono raggi gamma, e dunque contengono raggi cosmici che sono stati accelerati dall’esplosione. Rimane però da dimostrare se le *Supernovae* sono veramente la principale sorgente dei raggi cosmici che osserviamo sulla Terra (e nello spazio interstellare). La risposta finale a questa domanda è ancora dibattuta.

Le esplosioni di *Supernova* sono in realtà generate da due tipi di meccanismo completamente differenti, ma che secondo le teorie (e oggi anche le osservazioni) possono entrambi accelerare raggi cosmici. Un meccanismo è quello dell’esplosione nucleare di una stella nana bianca in un sistema binario, evento che la distrugge completamente. Il secondo (che abbiamo già introdotto in precedenza) è quello del collasso gravitazionale del nocciolo interno di ferro di una stella alla fine della sua vita, il nocciolo si trasforma in una stella di neutroni, oppure (in casi più rari quando la stella progenitrice ha massa sufficientemente grande) in un buco nero. Nelle stelle di neutroni la materia è compressa alla densità dei nuclei atomici in una sfera del raggio di circa dieci chilometri, mille volte più piccola del nocciolo

iniziale²⁴. Il rimpicciolimento della stella implica che la sua rotazione diventa più veloce, di circa un fattore un milione, per lo stesso motivo (la conservazione del momento angolare) per cui una pattinatrice su ghiaccio accelera la sua rotazione quando raccoglie le braccia vicino al corpo. In questo modo un periodo di rotazione di circa un mese (come quello del Sole) si accorcerebbe ad un paio di secondi. Per lo stesso motivo, il campo magnetico alla superficie della stella viene amplificato di circa un milione di volte durante il collasso. La rapida rotazione ed i forti campi magnetici generano complicati (e ancora solo parzialmente compresi) fenomeni elettromagnetici intorno alla stella di neutroni con importanti conseguenze. Il primo fenomeno ad essere stato scoperto è l’emissione di pulsazioni in onde radio con un periodo uguale a quello delle rotazioni, come i segnali luminosi di un faro. La stella di neutroni diventa così una Pulsar.

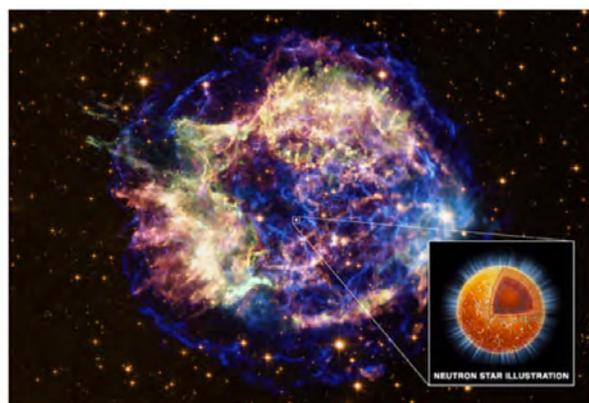


Figura 17: *Supernova Cassiopeia A* (l’immagine combina ottico e raggi X). Questa *Supernova* molto probabilmente è l’ultima osservata nella nostra Galassia, registrata il 16 luglio del 1680 dall’astronomo reale John Flamsteed. Si trova a 11mila anni luce dalla Terra, ed ha un diametro di 10 anni luce. Al centro si trova una sorgente puntiforme di raggi X: una stella di neutroni che si sta lentamente raffreddando.

La scoperta della prima Pulsar è stata fatta nel 1967 da Jocelyn Bell (utilizzando un sistema di telescopi radio disegnati da Martin Ryle

²⁴Nella materia a questa densità, è energeticamente favorevole per i protoni ed elettroni fondersi, emettendo neutrini (che poi fuggono dalla “proto-stella di neutroni”) con la reazione $e^- + p \rightarrow n + \nu_e$. È per questo che si parla di stelle di neutroni. Una piccola quantità di protoni ed elettroni rimane comunque dentro stella, e nella crosta di superficie.



Figura 18: *Crab Nebula* (l'immagine combina radio, ottico, e raggi X). La *Crab Nebula* è una Supernova esplosa nel 1054, alla distanza di 6500 anni luce dalla Terra. Al centro si trova una *Pulsar* con un periodo di 33 millisecondi. L'intricato aspetto della nebula è dovuto all'interazione di un vento di particelle emesse dalla *Pulsar* che interagisce con il materiale espulso dalla stella progenitrice nell'esplosione. Questa è la più luminosa delle *Pulsar Wind Nebulae*.

ed Anthony Hewish), che con sua grande sorpresa si rese conto che da un punto del cielo arrivava un ticchettio radio con un periodo di 1.336 secondi, di una brevità mai vista nella storia dell'astrofisica fino ad allora. Il fisico Thomas Gold suggerì subito che il segnale proveniva da una stella di neutroni. L'idea ebbe una spettacolare conferma quando circa un anno dopo una *Pulsar* con un periodo di 3.3 centesimi di secondo venne scoperto al centro di uno dei più famosi (e spettacolari) Resti di Supernova: la Nebulosa del Granchio, che sappiamo essere stata formata da un'esplosione osservata quasi mille anni fa, nell'anno 1054 e registrata come una nuova stella da osservatori in diverse parti del mondo (particolarmente dettagliata è stata la descrizione dell'evento da parte degli astronomi/astrologi dell'imperatore cinese).

Le osservazioni ad alta energia hanno mostrato che le *Pulsar* sono potenti sorgenti di raggi gamma, e potenti acceleratori di particelle. Le emissioni generate dalle *Pulsar* in alcuni casi si mescolano a quelle generate dalle particelle

accelerate dall'esplosione, ma hanno una diversa origine e sono alimentate da un meccanismo che estrae energia dalla rotazione della stella di neutroni, che rallenta gradualmente (il periodo della *Crab Pulsar* aumenta di 13 microsecondi all'anno).

In molti casi (oltre duecento) parte dell'emissione osservata è pulsata (con il periodo della rotazione), ma si osservano anche raggi gamma da una regione più grande intorno al corpo centrale, chiamata *Pulsar Wind Nebula*, alimentata da un vento di particelle che emerge dalla superficie della stella di neutroni. La più luminosa delle *Pulsar Wind Nebulae* è la *Crab Nebula*, che ha uno spettro che si estende fino al PeV (10^{15} eV o un milione di miliardi di elettron-Volt).

Nuclei Galattici Attivi

La maggior parte delle sorgenti di raggi gamma sono extra-galattiche, e sono distribuite uniformemente sulla sfera celeste. Queste sorgenti extra-galattiche appartengono nella quasi totalità alla classe di oggetti astrofisici conosciuti come *Active Galactic Nuclei* (AGN) o Nuclei Galattici Attivi. Questa è una delle scoperte più significative degli studi recenti sull'universo delle alte energie.

Oggi sappiamo che praticamente tutte le galassie hanno al loro centro una grande massa concentrata in un volume molto piccolo, che quasi certamente è nella forma di un buco nero supermassivo, dove super vuole dire qualcosa che va da milioni a molti miliardi di masse solari. Il premio Nobel per la fisica del 2020 è stato assegnato per metà a Roger Penrose "Per la scoperta che i buchi neri sono una robusta predizione della Teoria Generale della Relatività", e per la seconda metà a Reinhard Genzel ed Andrea Ghez "per la scoperta di un oggetto compatto supermassivo al centro della nostra Galassia". Il buco nero della nostra Galassia ha una massa di circa 4.1 milioni di masse solari, ma è un peso leggero a confronto di altri. Un buco nero supermassivo, recentemente è diventato notissimo in tutto il mondo, è quello al centro della galassia Messier 87 (M87), a circa 55 milioni di anni luce dalla Terra, che ha una massa di circa (6.5 ± 0.7) miliardi di masse solari, e di cui si è riusciti, combinando le osservazioni di telescopi radio distribuiti

in tutto il mondo, ad ottenere un'immagine con una risoluzione senza precedenti [10].

I buchi neri supermassivi sono (paradossalmente se si pensa al loro nome) le sorgenti più luminose dell'universo. La sorgente dell'energia che emettono è la gravità, che agisce accelerando la massa che vi cade dentro. Il meccanismo è fondamentalmente semplice. Immaginiamo un oggetto di massa m che cade verso la superficie solida di un corpo celeste. L'oggetto acquista velocità ed energia nella sua caduta. Quando colpisce la superficie del corpo, la sua velocità si annulla rapidamente, e l'energia cinetica acquistata nella caduta si converte in altre forme, come l'emissione di radiazione. Sappiamo che un buco nero non ha una superficie solida, ma lo si può immaginare come un profondissimo imbuto. Quando una stella si avvicina a sufficienza al buco nero, viene distrutta dalle forze di marea (dovute al fatto che le forze che agiscono su diversi punti della stella sono differenti) e la sua materia, disintegrata in gas, precipita verso il centro, come in un profondo imbuto che si restringe sempre di più. La strozzatura interrompe (momentaneamente) la caduta e l'energia cinetica del gas si può trasformare in altre forme²⁵.

Questo meccanismo di ottenere energia dalla forza di gravità può avere un'efficienza molto alta, che cresce con la profondità dell'imbuto. L'efficienza è massima quando il corpo che accresce massa è un buco nero²⁶. Un tasso di accrescimento di una massa solare all'anno corrisponde ad una luminosità di circa 10^{46} erg/sec (ovvero tremila miliardi di luminosità del Sole).

L'energia dell'emissione da un buco nero è dunque proporzionale al tasso di accrescimen-

to di massa. Per questo alcuni buchi neri (come quello al centro della nostra Galassia) non sono luminosissimi, mentre altri (quelli attivi) lo sono molto di più, e per questo la luminosità di un nucleo galattico attivo può avere grandi variazioni nel tempo che riflettono un tasso di accrescimento non costante.

Le considerazioni appena fatte permettono di ottenere una stima della quantità di energia che si può ottenere da un buco nero supermassivo che accresce massa, ma non dicono nulla della forma con cui questa energia viene rilasciata. Le emissioni dagli AGN prendono forme complesse ed affascinanti che sono ancora un oggetto di studio intenso. Un punto fondamentale è che le osservazioni hanno dimostrato che il rilascio di energia è associato all'accelerazione di raggi cosmici, ed alla emissione di raggi gamma e neutrini anche di altissima energia.

I nuclei galattici attivi si presentano come uno zoo di oggetti molto diversi: Seyferth galaxies, Radio galaxies, Quasars, Blazars, ... che hanno in comune il fatto che il centro della Galassia (una piccola regione spazialmente non risolta) è una potente sorgente di energia. Dalle osservazioni emerge il fatto che la grande variabilità nell'apparire di un AGN è in buona parte dovuta all'orientamento dell'asse di rotazione del buco nero al centro rispetto alla linea di vista dalla Terra, perché le emissioni sono fortemente anisotrope, e sono molto più forti lungo l'asse di rotazione.

Quello che emerge dalle osservazioni è che negli AGN vengono emessi due *getti* di plasma in direzioni opposte, presumibilmente lungo l'asse di rotazione del buco nero. Il getto non è uniforme, ma è formato da una sequenza di *blob*. Questi elementi non hanno una posizione costante nel cielo, ma misure ad alta risoluzione mostrano che si allontanano dal centro dell'AGN. Dalla velocità del movimento è possibile ricostruire la velocità con cui la materia che forma il getto viene emessa. Il risultato è sconcertante, perché si trova che la materia è emessa ad una velocità molto vicina a quella della luce. Il getto di M87 per esempio ha una velocità tra il 98 ed il 99% di quella della luce. Questo è particolarmente sorprendente perché questa non è la velocità di una particella, ma è la velocità di una materia (quasi certamente in forma di plasma) composta

²⁵Il gas possiede il momento angolare delle stelle disintegrate, e quando si avvicina al buco nero forma un disco di accrescimento che si riscalda ad altissima temperatura mentre il suo bordo interno scompare gradualmente oltre l'orizzonte.

²⁶L'efficienza è definita come il rapporto tra la massa che si accresce e l'energia che si può estrarre. L'energia cinetica che si può ottenere dalla massa m che cade da grande distanza fino alla distanza r_{min} dal centro di una massa M è $E = GMm/r_{min}$. Nel caso di un buco nero si può prendere per r_{min} una lunghezza dell'ordine di qualche volta l'orizzonte del buco nero (dato dal raggio di Schwarzschild $R_S = 2GM/c^2$). L'efficienza dunque è data da $m c^2/E \simeq 1/(2r_{min}/R_S)$, e può diventare molto grande. Calcoli più dettagliati che tengono conto della rotazione del buco nero ottengono efficienze che vanno da 0.06 a 0.42.



Figura 19: La “Nebula” Messier 87 (M87). Una galassia attiva alla distanza di 55 milioni di anni luce. Contiene il primo “jet” mai osservato. Venne notato da Heber Curtis nel (1918): “. . . un curioso raggio diritto appare connesso al nucleo da una sottile linea di materia”.

da moltissime particelle che si muovono insieme.

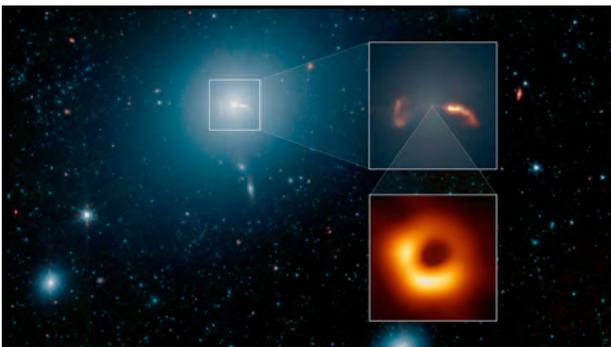


Figura 20: La galassia ellittica M87 contiene un buco nero supermassivo, di cui l’Event Horizon Telescope ha ottenuto un’immagine. Dal centro della galassia emergono due getti simmetrici, e quello emesso verso di noi appare molto più luminoso. L’accrescimento di materia sul buco nero è la sorgente dell’energia che alimenta i getti relativistici.

Le osservazioni dei telescopi per raggi gamma, sia da satellite che da terra, hanno mostrato che i nuclei galattici attivi in cui uno dei due getti viene emesso verso la Terra con un angolo minore di circa una decina di gradi (e che vengono chiamati *Blazars*) sono delle sorgenti molto luminose di fotoni nell’ intervallo 10^8 – 10^{13} eV (GeV–TeV). Questo dimostra che i getti sono siti dove particelle cariche sono accelerate almeno fino a queste energie.

Diversi studi teorici hanno anche suggerito che

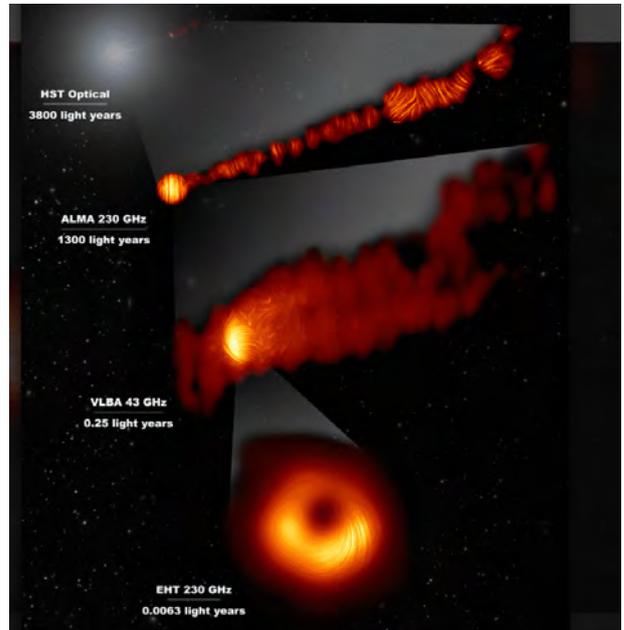


Figura 21: M87 Immagine in onde radio del buco nero al centro di M87, ed il getto emesso in una direzione a circa dieci gradi dalla linea di vista dalla Terra. Il contro getto emesso nella direzione opposta non è visibile.

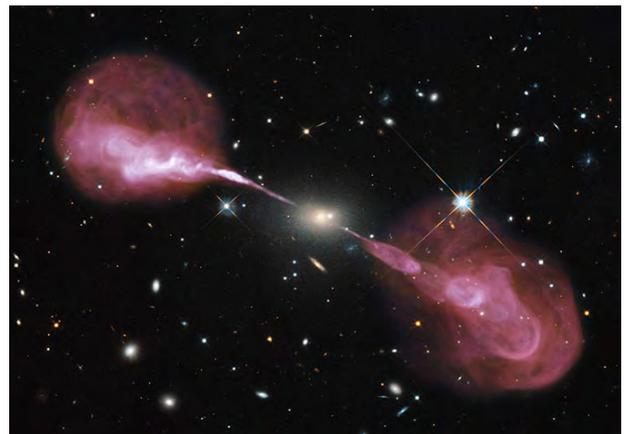


Figura 22: Nucleo Galattico Attivo (AGN) Hercules A, distante 2.1 miliardi di anni luce. L’immagine combina lo spettro di radiazione ottico (Hubble telescope) con quello radio (Jansky VLA telescope). L’immagine radio si estende molte volte oltre le dimensioni della galassia in ottico, ed ha la forma di due getti che terminano in due giganteschi blob radio. Questa è la struttura tipica degli AGN.

gli AGN sono in grado di accelerare particelle fino alle massime energie osservate per i raggi cosmici (che arrivano fino a 10^{20} eV). Abbiamo discusso in precedenza come la maggior parte dei raggi cosmici osservati alla Terra siamo di origine Galattica (cioè generati nella Via Lattea). Raggi cosmici da sorgenti extragalattiche posso-

no però anche penetrare nella Galassia e raggiungere la Terra, e ci si attende che questo contributo diventi dominante ad energie sufficientemente grandi²⁷. I nuclei galattici attivi sono un candidato naturale per essere l'origine della componente extragalattica dei raggi cosmici, e questa ipotesi è oggetto di studi sperimentali da parte dei rivelatori di sciame estesi come l'osservatorio Pierre Auger. [11]. La deviazione subita dalle particelle cariche a causa della presenza dei campi magnetici diminuisce con il crescere della loro energia (o più precisamente rigidità magnetica), e ci si attende che queste deviazioni diventino sufficientemente piccole anche per distanze extragalattiche, in modo da potere "correlare" le direzioni di arrivo dei raggi cosmici di energia più grande con le posizioni nel cielo delle loro sorgenti lontane, permettendo così la loro identificazione. Questa "astronomia" con particelle cariche richiede osservazioni prolungate con telescopi di grande accettazione, perché i flussi sono molto deboli, ed i risultati raggiunti finora non permettono ancora di raggiungere conclusioni certe [12], ma studi futuri saranno di grande interesse.

Evidenza sperimentale che i nuclei galattici attivi sono in grado di accelerare protoni e nuclei fino ad energie altissime è stata ottenuta grazie alle osservazioni dei neutrini di alta energia (10^{14} – 10^{16} eV) da parte di IceCube. Questo telescopio per neutrini ha rivelato un flusso extragalattico di neutrini, e dimostrato che una parte importante di questo flusso è generato nei *Blazars*. In particolare un AGN (il Blazar conosciuto con il nome di TXS 0506+56, distante circa 5.7 miliardi di anni luce dalla Terra, e studiato con fotoni in un ampio intervallo di lunghezze d'onda) è stato chiaramente identificato come sorgente di neutrini [13]. Le osservazioni hanno anche dimostrato che l'emissione non è costante nel tempo, ma è formata da una sequenza di "fiotti" di neutrini di diversa lunghezza temporale, che coincidono con i periodi in cui la sorgente è più luminosa anche in fotoni.

²⁷Questo avviene in parte perché nella Galassia scarseggiano o sono assenti sorgenti capaci di raggiungere le energie più elevate, ed in parte perché i campi magnetici Galattici non sono sufficientemente forti da confinare particelle di altissima rigidità magnetica.

Gamma Ray Bursts

La scoperta dei *Gamma Ray Bursts* (Lampi di Raggi Gamma o GRB) è uno dei capitoli più affascinanti nella storia dell'astrofisica delle alte energie. La scoperta avvenne per caso nel 1967 grazie ai satelliti Vela messi in orbita dagli USA per identificare test di esplosioni nucleari da parte dell'Unione Sovietica. I satelliti registrarono bagliori di raggi gamma, di una durata variabile che andava dalla frazione di secondo a molte decine di secondo. Fu subito chiaro che se gli eventi erano extragalattici, come suggerito dalla loro isotropia, il rilascio di energia doveva essere enorme.

Per tre decenni questi eventi restarono misteriosi fino a quando nel 1997 venne messo in orbita il satellite Beppo-SAX [15], che riuscì per la prima volta a misurare anche la coda di emissione (in inglese *afterglow*) formata da raggi X, più debole, ed in continua diminuzione che segue ai lampi. Questa coda permette di determinare con precisione molto maggiore la posizione dell'evento nel cielo, e quindi di associarlo ad osservazioni con altre lunghezze d'onda. Questo ha permesso di stabilire che i GRB sono effettivamente eventi esplosivi (e che non si ripetono) extragalattici.

L'astrofisica dei GRB è un argomento complesso ed ancora controverso, ma alcune cose sono state solidamente stabilite. Esistono due diversi tipi di Gamma Ray Bursts. Il primo tipo, i GRB lunghi, con una durata mediana di circa trenta secondi, è associato alle *Supernovae*. Una frazione delle *Supernovae* del tipo generato da collasso gravitazionale, produce non solamente una onda d'urto quasi sferica che disintegra la stella, ma anche due getti che espellono plasma a velocità relativistiche lungo l'asse di rotazione della stella progenitrice, ed il lampo gamma è visibile quando la linea di vista dalla Terra è allineata con questo asse.

Il secondo tipo, i GRB brevi, con una durata mediana di circa un secondo, è invece associato alla coalescenza di oggetti compatti, ed in particolare di due stelle di neutroni. Questa idea è stata a lungo un'ipotesi teorica, ma avuto uno spettacolare conferma il 17 agosto del 2017, quando è stata osservata una coincidenza tra un segnale di onde gravitazionali (indicato dalla sigla

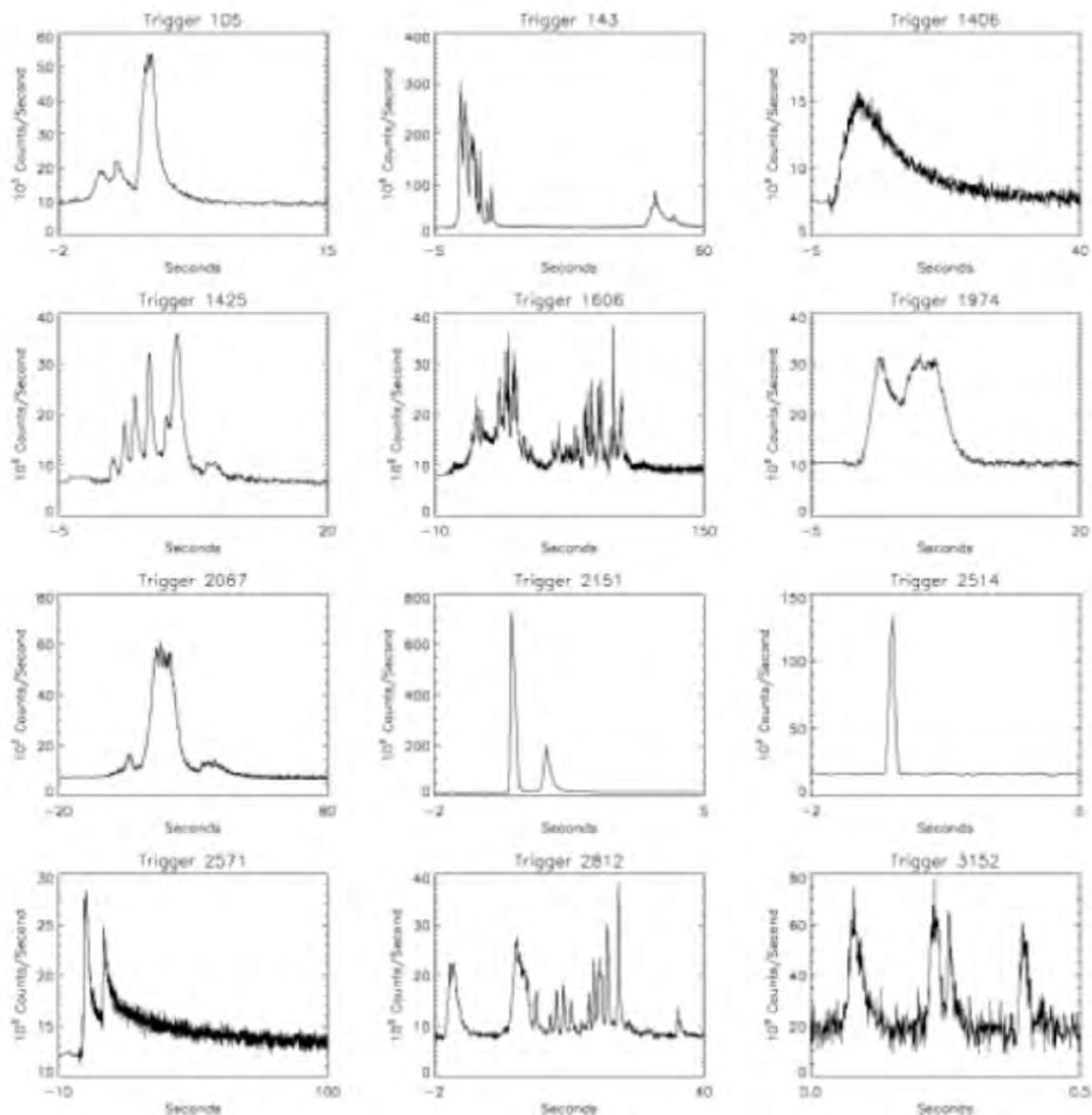


Figura 23: Esempi di curve di luce dei Gamma Ray Bursts [14].

GW170817 che contiene la sua data) ed un GRB breve (GRB 170817A). Moltissimi telescopi hanno puntato nella direzione dell'evento, ed osservato che in una galassia a 140 milioni di anni luce da noi era avvenuta una esplosione di *supernova* qualcosa di nuovo che è stato studiato con grande dettaglio, una sorta di *Supernova*, ma differente da tutte le altre, chiamata ora *kilonova*²⁸.

²⁸La parola *kilonova* è entrata nel vocabolario scientifico solo da una decina di anni (dal 2010) per indicare il transiente ottico di una coalescenza di stelle di neutroni. Il termine ha la sua origine nel fatto che le predizioni teoriche calcolavano un transiente circa mille volte più luminoso di una Nova ordinaria. L'emissione del transiente è generata dai decadimenti dei nuclei radioattivi formati nell'esplosione che segue ad una coalescenza. In queste coalescenze una parte (dell'ordine di un deci-

Il futuro

La scoperta dei raggi cosmici all'inizio del ventesimo secolo ha rappresentato il primo sguardo su quello che oggi è comunemente chiamato l'universo delle alte energie. L'osservazione di particelle relativistiche di altissima energia

mo) delle stelle di neutroni viene "lanciata" nello spazio interstellare. I nuclei (che formano la "crosta" esterna delle stelle) sono investiti da un intenso flusso di neutroni, li assorbono, ed in questo modo, dopo successivi decadimenti beta si formano nuclei più "pesanti". I calcoli teorici suggeriscono che questo è il meccanismo per la formazione degli elementi con grande numero atomico Z (come ad esempio l'oro). Le osservazioni della *kilonova* associata all'evento GW170817 sono in ottimo accordo con le previsioni.



Figura 24: La *kilonova* associata alla coalescenza di due stelle di neutroni osservata il 17 agosto 2017 come segnale di onde gravitazionali (GW170817) e come GRB breve (GRB 170817A).

ovviamente indicava che dovevano esistere sorgenti e meccanismi capaci di generarle, ma la natura di queste sorgenti e di questi meccanismi era completamente sconosciuta, e sarebbe rimasta misteriosa per molte decadi

Gli ultimi anni hanno visto grandissimi progressi nel sollevare i veli che hanno tenuto nascosto l'universo delle alte energie. La chiave di questi successi è stata la comprensione che per studiare i fenomeni di alta energia è necessario combinare le misure dei raggi cosmici con le osservazioni dei raggi gamma (e più in generale dei fotoni in tutte le lunghezze d'onda) e dei neutrini. Lo sviluppo di telescopi più potenti ha finalmente permesso di identificare non solo molte sorgenti di alta energia, ma molte classi di sorgenti: *Supernovae*, Pulsar, Nuclei Galattici Attivi, *Star Burst galaxies*, *Gamma Ray Bursts*, ...

Alcune di queste sorgenti corrispondono anche agli eventi più violenti dell'universo dopo il Big Bang iniziale, perché alla base dei meccanismi che generano le particelle di alta energia, c'è spesso la fortissima accelerazione di grandi masse. Questi sono esattamente gli eventi capaci di increspature lo spazio-tempo con l'emissione di onde gravitazionali, e dunque possono essere osservabili dalle presenti e future antenne.

La chiave per progredire nella comprensione dei fenomeni di alta energia è dunque di combinare le osservazioni di questi quattro messaggeri: raggi cosmici, fotoni, neutrini ed onde gravitazionali. I primi risultati di questa nuova astronomia multimessaggera sono già di grandissimo interesse, ma le prospettive per il futuro sono ancora più promettenti. La qualità delle osservazioni nel prossimo futuro migliorerà in modo significativo, perché esistono progetti di nuovi telescopi e nuovi strumenti per tutti e quattro i messaggeri. Le nuove osservazioni promettono di comprendere meglio le proprietà delle sorgenti note, e di scoprirne di nuove.

La storia dell'astronomia fino ad oggi può essere vista come una graduale espansione dell'intervallo di lunghezza d'onda (o di energia) dei fotoni utilizzati per le osservazioni a partire dalla ristretta banda dei fotoni ottici (visibili per nostri occhi). Ogni passo in questa direzione, l'apertura di ogni nuova finestra (luce infrarossa, luce ultravioletta, onde radio, raggi X, raggi gamma, ...) non solo ha permesso una migliore comprensione di ciò che era già conosciuto, ma ha portato a sorprese, alla scoperta di nuovi oggetti astrofisici e nuovi fenomeni. Siamo oggi testimoni di un'espansione molto più profonda, con l'utilizzo di *nuovi messaggeri* che permettono di vedere l'universo intorno a noi in modo completamente nuovo, con occhi diversi.

La comprensione del cosmo che ci circonda è un progetto che ha impegnato l'umanità da tempi remoti, e dunque conoscere l'universo delle alte energie e gli strani oggetti/eventi da una parte è qualcosa che di per se è profondamente affascinante. D'altra parte gli oggetti/eventi dell'universo delle alte energie sono anche i luoghi dove si incontrano le condizioni più estreme: le densità di materia più grandi, i campi magnetici più elevati, le interazioni alle energie più elevate, ..., e quindi possono anche essere considerati come dei laboratori per testare le leggi fondamentali della fisica in condizioni che non possono essere create in un laboratorio sulla Terra. Astronomia/astrofisica e fisica fondamentale sono sempre state profondamente intrecciate nella storia della scienza (a partire da Newton e la scoperta delle equazioni della dinamica, la comprensione della sorgente di energia del Sole, delle stelle e la fusione nucleare, il collasso gravitazio-

nale e le leggi della statistica quantistica, ...) e continuano ad essere legate da mille fili.



- [1] Bruno Rossi: *I raggi cosmici*, Einaudi, Torino (1971).
- [2] Pamela Collaboration: *The PAMELA Mission: Heralding a new era in precision cosmic ray physics*, Phys. Rep., 544 (2014) 323.
- [3] AMS Collaboration: *The Alpha Magnetic Spectrometer (AMS) on the international space station: Part II — Results from the first seven years*, Phys. Rep., 894 (2021) 1.
- [4] EGRET Collaboration: *The Third EGRET catalog of high-energy gamma-ray sources*, Astrophys. J. Suppl., 123 (1999) 79.
BATSE Collaboration: *Identification of two classes of gamma-ray bursts*, Astrophys. J. Lett., 413 (1993) L101.
- [5] Fermi–LAT Collaboration: *Fermi-LAT Observations of the Diffuse Gamma-Ray Emission: Implications for Cosmic Rays and the Interstellar Medium*, Astrophys. J., 750 (2012) 3.
Fermi Large Area Telescope Fourth Source Catalog, Astrophys. J. Suppl., 247 (2020) 33.
- [6] Cherenkov Telescope Array Collaboration: *Science with the Cherenkov Telescope Array*, [arXiv:1709.07997 [astro-ph.IM]].
- [7] LHAASO Collaboration: *The Large High Altitude Air Shower Observatory (LHAASO) Science Book*, Chin. Phys. C, 46 (2022) 035001.
- [8] F. Halzen and A. Kheirandish: *IceCube and High-Energy Cosmic Neutrinos*, [arXiv:2202.00694 [astro-ph.HE]].
IceCube Collaboration: *Evidence for High-Energy Extraterrestrial Neutrinos at the IceCube Detector*, Science, 342 (2013) 1242856.
- [9] KM3Net Collaboration: *Letter of intent for KM3NeT 2.0*, J. Phys. G, 43 (2016) 084001.
- [10] Event Horizon Telescope Collaboration, K. Akiyama et al. [Event Horizon Telescope]: *First M87 Event Horizon Telescope Results. I. The Shadow of the Supermassive Black Hole*, Astrophys. J. Lett., 875 (2019) L1.
- [11] Pierre Auger Observatory Collaboration: *Features of the Energy Spectrum of Cosmic Rays above 2.5×10^{18} eV Using the Pierre Auger Observatory*, Phys. Rev. Lett., 125 (2020) 121106.
- [12] Pierre Auger Observatory Collaboration: *An Indication of anisotropy in arrival directions of ultra-high-energy cosmic rays through comparison to the flux pattern of extragalactic gamma-ray sources*, Astrophys. J. Lett., 853 (2018) L29.
- [13] IceCube Collaboration: *Multimessenger observations of a flaring blazar coincident with high-energy neutrino IceCube-170922A*, Science, 361 (2018) eaat1378.
Neutrino emission from the direction of the blazar TXS 0506+056 prior to the IceCube-170922A alert, Science, 361 (2018) 147
- [14] BATSE Collaboration: *BATSE observations of gamma-ray burst spectra. 1. Spectral diversity*, Astrophys. J., 413 (1993) 281.
- [15] E. Costa, et al.: *Discovery of an X-ray afterglow associated with the gamma-ray burst of 28 February 1997*, Nature, 387 (1997) 783.



Paolo Lipari: è Dirigente di Ricerca presso la Sezione di Roma Sapienza dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare. Da molti anni il suo principale interesse scientifico è lo studio dell'universo delle alte energie.