

---

# Come sono accelerati i raggi cosmici?

*Those who became interested in cosmic rays tended to be rugged individualists, to be iconoclastic, and to march to the drummer in their own heads rather than some distant one.*

**V. Fitch**

---

**Stefano Gabici** *Université de Paris, CNRS, Astroparticule et Cosmologie, F-75013 Paris, France*

---

**L'**atmosfera terrestre è costantemente bombardata da un flusso di particelle di alta energia (in stragrande maggioranza nuclei atomici) provenienti dal cosmo: i raggi cosmici. L'energia media di queste particelle è diverse migliaia di volte inferiore a quelle riproducibili negli acceleratori del CERN, mentre quella massima è circa cento miliardi di volte quella media. Questo implica che nell'Universo debbano operare dei meccanismi di accelerazione di particelle estremi, la cui natura è tuttora dibattuta.

## Tipi bizzarri?

In un bell'articolo apparso nel 1999 su *Reviews of Modern Physics* [1], il premio Nobel Val Logsdon Fitch ripercorre gli anni durante i quali la fisica delle particelle maturò fino a diventare una disciplina autonoma. Fino agli anni cinquanta, infatti, l'unico strumento a disposizione dei fisici per studiare il mondo delle particelle elementari era l'osservazione delle interazioni dei raggi cosmici nell'atmosfera terrestre. Quando gli acceleratori di particelle riuscirono a eguagliare l'e-

nergia (media) delle particelle che compongono la radiazione cosmica, divenne possibile creare in laboratorio collisioni tra particelle di alta energia. L'avvento degli acceleratori fu accompagnato da un grande (e comprensibile) entusiasmo all'interno della comunità scientifica, e la maggior parte dei fisici spostarono la loro attenzione dai raggi cosmici ai laboratori, dove gli scontri tra particelle, col passare degli anni, erano caratterizzati da energie sempre più elevate.

La minoranza che continuò, testardamente, a studiare i raggi cosmici era formata, secondo Fitch, da "burberi individualisti iconoclasti". Gente che remava controcorrente. Tipi bizzarri?

## John Linsley: fino a che energie si estende lo spettro dei raggi cosmici?

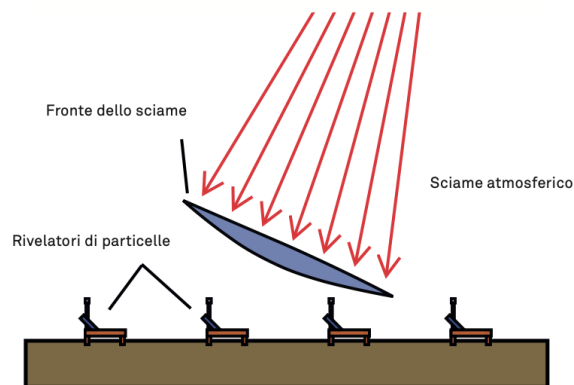
Uno degli ultimi fisici ad impersonificare piuttosto fedelmente la definizione di Fitch fu lo statunitense John Linsley che, a cavallo tra gli anni cinquanta e sessanta, costruì insieme al collega italiano Livio Scarsi, e poi operò in quasi totale solitudine, il più grande rivelatore di raggi cosmici dell'epoca. A Volcano Ranch, nel deserto

del New Mexico, Linsley e Scarsi installarono 19 rivelatori di particelle sparsi su una superficie di circa 8 km<sup>2</sup>.

Il principio del funzionamento di questo tipo di rivelatori è basato sul fatto che quando un raggio cosmico impatta su una molecola dell'atmosfera terrestre, una parte dell'energia della collisione può essere convertita in particelle di più bassa energia. Queste particelle, dette **secondarie**, possono a loro volta interagire nell'atmosfera generando altre particelle, in un processo a catena che porta alla formazione di uno sciame atmosferico formato da un numero progressivamente crescente di particelle. Quando l'energia delle particelle dello sciame scende sotto una certa soglia, il processo di moltiplicazione si arresta (l'energia delle collisioni non è più sufficiente a creare nuove particelle). Le particelle iniziano quindi a perdere gradualmente la loro energia negli urti con le molecole dell'atmosfera e lo sciame, gradualmente, si estingue.

Se il raggio cosmico primario è di energia sufficientemente elevata, lo sciame che genera può raggiungere il suolo prima di estinguersi nell'atmosfera, investendo un'ampia superficie di terreno. Quanto più grande è l'energia del raggio cosmico primario, tanto più numerose sono le particelle nello sciame, e tanto maggiore è l'area di terreno investita. Disseminando un gran numero di rivelatori di particelle nel deserto del New Mexico, Linsley voleva spingere le osservazioni dei raggi cosmici a energie mai esplorate prima (Fig. 1). L'impresa non era semplice, perché era già noto all'epoca che il numero di raggi cosmici che piovono sulla terra diminuisce rapidamente al crescere dell'energia.

Il 22 febbraio 1962, la perseveranza e la tenacia di Linsley vennero premiate. I rivelatori di Volcano Ranch misurarono uno sciame contenente circa 30 miliardi di particelle! Niente del genere era mai stato osservato, e l'energia stimata per il raggio cosmico primario era davvero sensazionale: l'equivalente dell'energia di una palla da baseball lanciata a 50 km/h (o  $\approx 10^{20}$  eV, per usare un'unità di misura in voga nella comunità scientifica dei raggi cosmici). Questa energia è decine di miliardi di volte più alta dell'energia del raggio cosmico medio che bombardava l'atmosfera terrestre. Gli studi di Linsley e di altri studiosi che hanno continuato per la sua



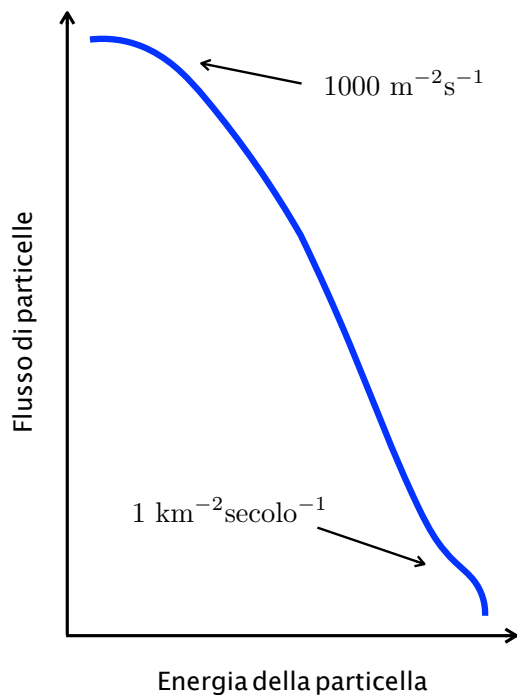
**Figura 1:** Una schiera di rivelatori di particelle permette di registrare l'arrivo al suolo di uno sciame atmosferico (Wikimedia Commons).

strada nei decenni seguenti mostrano che, mentre i raggi cosmici di energia media bombardano l'atmosfera terrestre a un ritmo di migliaia di particelle per metro quadro per secondo, i raggi cosmici di energia massima sono rarissimi: uno per kilometro quadro per secolo (Fig. 2). La loro esistenza dimostra che nell'Universo debbano esistere dei veri e propri mostri capaci di accelerare minuscoli nuclei atomici fino ad energie esorbitanti.

Chi volesse approfondire le tecniche di rivelazione dei raggi cosmici può far riferimento al classico testo di Bruno Rossi [2]. Resoconti sugli sviluppi degli studi sui raggi cosmici fino a tempi recenti possono essere trovati nelle referenze [3, 4], mentre Linsley ha raccontato la sua versione dei fatti nella referenza [5].

## Michael Hillas: chi accelera i raggi cosmici?

Chi accelera, quindi, le particelle più energetiche mai osservate nell'Universo? Come spesso accade nella scienza, le risposte migliori a questioni estremamente complesse si ottengono grazie a brutali semplificazioni. Le semplificazioni, va da sé, devono essere non solo brutali, ma anche intelligenti. Spetta al fiuto del buon fisico individuare il minor numero possibile di elementi che sono essenziali per la risoluzione del problema. La questione è delicata, perché se si semplifica troppo poco il problema resta spesso troppo complesso, mentre se si semplifica troppo la risposta



**Figura 2:** Il flusso di particelle cosmiche che impattano l'atmosfera terrestre decresce rapidamente all'aumentare dell'energia delle particelle.

che si ottiene è quasi sempre sbagliata. Fu il fisico inglese Michael Hillas a compiere un piccolo capolavoro, e a proporre alla comunità scientifica un criterio semplicissimo ma anche efficacissimo per decidere se un dato oggetto astrofisico possa, potenzialmente, accelerare i raggi cosmici di una certa energia. Questa procedura, ben presto battezzata con il nome di "criterio di Hillas", fu presentata in un famosissimo articolo del 1984 ed è tuttora utilizzata da chiunque voglia studiare l'origine dei raggi cosmici [6].

Hillas decise di non affrontare di petto il problema dell'accelerazione dei raggi cosmici. In un primo momento, stabilì di non interessarsi a come i raggi cosmici vengano accelerati, ma a chi li acceleri. Il suo ragionamento partì dalla considerazione che i campi magnetici sono onnipresenti nell'Universo. Inoltre, i raggi cosmici sono particelle elettricamente cariche (nuclei atomici), e saranno quindi deflessi da questi campi magnetici. Qualsiasi tentativo di comprendere le sorgenti dei raggi cosmici deve quindi tenere in conto questo fatto. Supponiamo quindi di avere una potenziale sorgente di raggi cosmici, all'in-

terno della quale vi sia un campo magnetico di una certa intensità. Supponiamo inoltre, che la sorgente abbia accelerato un raggio cosmico fino a una certa energia. Per semplificare il problema, supponiamo che il raggio cosmico si muova in una direzione ortogonale (a 90 gradi) a quella delle linee di forza del campo magnetico. In questo caso la traiettoria della particella sarà perfettamente circolare. Il raggio di questa traiettoria sarà più grande per particelle di energia maggiore, e più piccolo per campi magnetici più intensi. L'intuizione di Hillas fu quella di confrontare il raggio di questa traiettoria con la dimensione della sorgente astrofisica. Se il raggio della traiettoria è molto maggiore della dimensione della sorgente, la particella potrà facilmente fuggire dalla sorgente prima di essere deflessa in maniera significativa. Se invece il raggio della traiettoria è di molto inferiore alla dimensione della sorgente, la particella resterà intrappolata al suo interno. È difficile pensare che un oggetto astrofisico possa accelerare una particella se questa può sfuggirgli troppo rapidamente, e questo portò alla formulazione del **criterio di Hillas**: una sorgente astrofisica caratterizzata da una data dimensione e da un dato campo magnetico può potenzialmente accelerare una particella fino a una data energia solamente se la dimensione della sorgente è superiore al raggio di girazione della particella nel campo magnetico.

Per una discussione più quantitativa, va ricordato che il **raggio di girazione** di un nucleo atomico è definito come

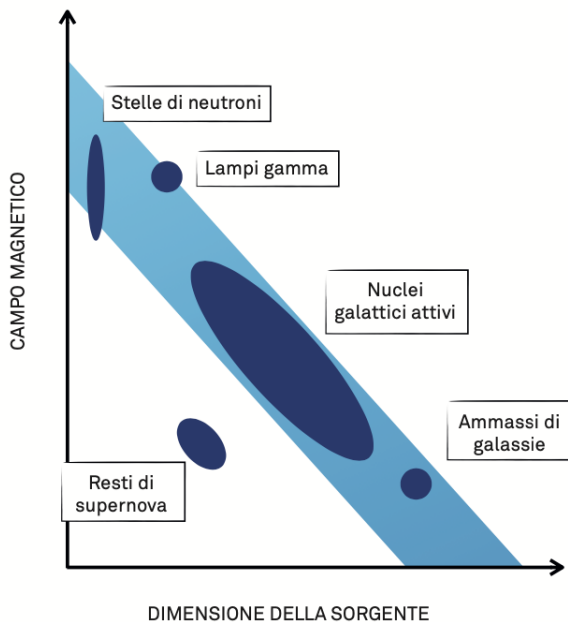
$$r_g = E(\text{eV})/300 Z B(\text{G}) \text{ cm} ,$$

dove  $E$  è l'energia della particella in eV,  $Z$  il numero atomico e  $B$  l'intensità del campo magnetico in Gauss. La condizione per accelerare una particella di energia simile a quella rivelata da Linsley in un acceleratore cosmico di raggio  $L$  è quindi  $r_g < L$ , ovvero:

$$L > 0.1 Z^{-1} \left( \frac{E}{10^{20} \text{ eV}} \right) \left( \frac{B}{\text{G}} \right)^{-1} \text{ pc} \quad (1)$$

dove abbiamo introdotto il **parsec** che è un'unità di misura spesso usata in astrofisica ( $1 \text{ pc} = 3 \times 10^{18} \text{ cm}$ ).

Hillas aveva ridotto un problema molto complesso alla determinazione di due proprietà fi-



**Figura 3:** Il diagramma di Hillas.

siche degli oggetti astrofisici: dimensione della sorgente stessa e intensità del campo magnetico in essa contenuto. È possibile rappresentare visivamente questo concetto con un grafico noto come **diagramma di Hillas**. Vediamo come. Nel diagramma cartesiano mostrato in Fig. 3, l'asse orizzontale rappresenta il raggio della sorgente astrofisica  $L$ , mentre l'asse verticale l'intensità del campo magnetico  $B$ . Una data sorgente astrofisica occuperà una certa regione in questo diagramma. Il criterio di Hillas impone che solamente le sorgenti che si trovino al di sopra (Eq. 1) della banda diagonale visibile nel diagramma possano potenzialmente accelerare raggi cosmici di energia estrema. Il fatto che la banda colorata sia inclinata significa che i raggi cosmici più energetici possono essere accelerati sia da oggetti piccolissimi, ma dotati di campi magnetici di intensità elevatissima (ovvero quelli che occupano la regione in alto a sinistra del grafico), sia da oggetti enormi dotati di campi magnetici di intensità molto bassa (regione in basso a destra nel diagramma). Solo una manciata di oggetti astrofisici noti soddisfa questo criterio. Come descritto nel riquadro "Acceleratori cosmici", questi sono tra gli oggetti più estremi conosciuti nell'Universo, ma nonostante ciò si collocano nel diagramma a cavallo, non al di sopra, della barra colorata. Questo significa che accelerare i raggi cosmici più energetici è dif-

ficile anche per gli oggetti più estremi presenti nell'Universo! Comprendere quali tra questi oggetti siano i responsabili dell'accelerazione dei raggi cosmici che osserviamo sulla Terra resta una sfida ancora aperta per gli scienziati.

## L'idea di Fermi

L'ultima importante questione da affrontare riguarda come i raggi cosmici vengano accelerati. Quale meccanismo astrofisico può imprimere a minuscoli corpuscoli energie così elevate da farli muovere a una velocità vicinissima a quella della luce? Fu Enrico Fermi, a cavallo tra gli anni Quaranta e Cinquanta, ad avere l'intuizione che permise di comprendere come i raggi cosmici potessero acquistare la loro energia [7]. Questa idea semplice ma fondamentale è la base sulla quale poggia la grande maggioranza degli studi teorici sull'accelerazione dei raggi cosmici effettuati fino a oggi. Il meccanismo di accelerazione di Fermi fu pensato per spiegare i raggi cosmici galattici, ma in realtà ha avuto e ha tuttora un grande impatto anche per quanto riguarda l'accelerazione dei raggi cosmici extragalattici.

Fermi notò che il disco della nostra galassia è pervaso da un gas di bassa densità detto mezzo interstellare, e anche da un campo magnetico. Sono due le proprietà fondamentali di questo gas magnetizzato. Per prima cosa, la sua densità e l'intensità del campo magnetico non sono uguali ovunque nel disco galattico, ma vi sono regioni in cui queste grandezze fisiche sono più elevate che altrove. In altre parole, gas e campo magnetico interstellari sono disomogenei. La seconda importante caratteristica è che gas e campo magnetico non sono entità statiche, bensì dinamiche. Il gas interstellare si muove in modo vorticoso, e trascina con sé il campo magnetico. Questa proprietà è chiamata turbolenza.

Ancora una volta, l'intuizione geniale fu quella di semplificare enormemente il problema. Per prima cosa, per tener conto della disomogeneità nella distribuzione di gas e campo magnetico nel disco galattico, Fermi fece la seguente ipotesi: gas e campo magnetico sono concentrati in nuvolette, al di fuori delle quali non c'è nulla. Un raggio cosmico, quindi, viaggerà indisturbato, muovendosi lungo una linea retta, fino a che non incontrerà una nuvoletta. La collisione del

## Acceleratori cosmici

Scivolando dalla regione in alto a sinistra del diagramma di Hillas (Fig. 3) fino a quella in basso a destra incontriamo gli oggetti più estremi dell'Universo.

**Stelle di neutroni** – Nascono dalle esplosioni di supernova, e sono uno dei possibili stadi finali dell'evoluzione di stelle molto più massicce del Sole. Hanno una massa confrontabile a quella del Sole, ma un raggio di appena una decina di chilometri, il che significa che sono densissime ( $\sim 10^8$  tonnellate/cm<sup>3</sup>). Si formano a causa del collasso gravitazionale della parti più interne della stella originaria: durante il collasso il campo magnetico resta intrappolato nel gas, e viene compresso fino a raggiungere valori elevatissimi.

**Lampi gamma** – Sono intensissimi lampi di raggi gamma di durata variabile dai millisecondi ai minuti. Appaiono nel cielo al ritmo di circa uno al giorno. All'origine di questi violentissimi eventi c'è il collasso gravitazionale di una stella supermassiva, o la fusione di due stelle di neutroni orbitanti una attorno all'altra.

**Nuclei galattici attivi** – Una galassia su cento emette dal suo nucleo quantitativi di radiazione molto superiori alla norma. Ciò è dovuto alla presenza di un buco nero supermassiccio (fino a miliardi di masse solari) che inghiotte materia dal mezzo circostante e la emette a una velocità prossima a quella della luce.

**Ammassi di galassie** – Sono enormi strutture contenenti fino a migliaia di galassie. Benché il loro campo magnetico sia piuttosto debole, le loro enormi dimensioni (più di cento volte quelle della nostra galassia) li rende dei buoni candidati per l'accelerazione di raggi cosmici.

**Resti di supernova** – La parte al di sotto della banda colorata nel diagramma di Hillas è popolata da moltissimi oggetti. Segnaliamo qui i resti di supernova perché gli scienziati ritengono che siano questi oggetti a produrre la stragrande maggioranza dei raggi cosmici (quelli di energia media). I resti di supernova non sono altro che l'onda d'urto che si propaga nel gas interstellare a seguito dell'esplosione.

raggio cosmico con la nuvoletta magnetizzata provocherà una deflessione della traiettoria del raggio cosmico. Se le nuvolette sono ferme, l'energia del raggio cosmico resterà invariata dopo la collisione. Possiamo servirci di un'analogia per comprendere quest'ultima affermazione. Sostituiamo il raggio cosmico con una pallina da tennis, e la nuvoletta con una racchetta. Se la racchetta è immobile (e se trascuriamo gli effetti dell'attrito e altri dettagli) la pallina rimbalzerà sul piatto delle corde e dopo la collisione si allontanerà dalla racchetta alla stessa velocità con la quale vi si avvicinava prima dell'impatto. Stessa velocità significa anche stessa energia.

Fermi a questo punto doveva tener conto anche dell'aspetto dinamico e turbolento del problema. E lo fece assegnando a ogni nuvoletta una velocità. Per semplificare ulteriormente il problema, si può ipotizzare che le nuvolette si muovano tutte alla stessa velocità, ma in direzioni casuali. A questo punto, si possono dividere le collisioni tra raggio cosmico e nuvolette in due categorie:

le collisioni frontali, nelle quali il raggio cosmico e la nuvoletta si corrono incontro, e le collisioni da tergo, nelle quali il raggio cosmico insegue la nuvoletta. Ripensando all'analogia con la pallina e la racchetta da tennis sarà facile intuire che dopo una collisione frontale il raggio cosmico avrà aumentato la propria energia, mentre dopo una collisione da tergo l'energia sarà minore di quella iniziale.

A prima vista si potrebbe pensare che, dato che le nuvolette si muovono lungo direzioni casuali, un raggio cosmico subirà in media lo stesso numero di collisioni frontali e da tergo. In questo caso, il guadagno netto di energia sarebbe nullo. Una riflessione più attenta, però, rivela che questo ragionamento non è corretto. Il motivo è che il tempo che un raggio cosmico impiega per compiere una collisione frontale è minore di quello necessario per compiere una collisione da tergo. Questo perché nel primo tipo di collisione raggio cosmico e nuvoletta si corrono incontro, mentre nel secondo il raggio cosmico impiega un



tempo maggiore per raggiungere una nuvoletta che si allontana. In media, quindi, un raggio cosmico subisce più collisioni frontali che da tergo, e quindi la sua energia cresce gradualmente con il passare del tempo. Questa intuizione di Fermi resta tutt'oggi un pilastro della Fisica dell'accelerazione dei raggi cosmici. I campi magnetici, onnipresenti nell'Universo, giocano quindi un ruolo fondamentale anche nei meccanismi di accelerazione dei raggi cosmici.

## Meccanismi di accelerazione al primo e secondo ordine

Lo stesso Fermi si rese ben presto conto che la sua idea aveva un punto debole. L'incremento relativo medio di energia di un raggio cosmico è dell'ordine di  $\langle \Delta E/E \rangle \approx (V/c)^2$  per collisione, dove  $V$  è la velocità tipica delle nuvolette magnetizzate, e  $c$  la velocità del raggio cosmico, dell'ordine della velocità della luce (per una derivazione di questo risultato si veda il riquadro "Il meccanismo di Fermi per l'accelerazione dei raggi cosmici"). Nell'espressione compare il quadrato del rapporto  $V/c$ , e per questo motivo si parla spesso di meccanismo di Fermi al secondo ordine. Il fatto che le velocità tipiche dei moti turbolenti del gas interstellare siano al più dell'ordine di  $\sim 100$  km/s implica che un raggio cosmico incrementi la sua energia di un fattore minuscolo dopo ogni collisione,  $\langle \Delta E/E \rangle \approx 10^{-5} (V/100 \text{ km/s})^2$ , ovvero, l'energia cambia in maniera apprezzabile dopo centinaia di migliaia di collisioni! Questo rende il meccanismo al secondo ordine poco efficace, perché il tempo di fuga delle particelle dalla regione magnetizzata (in questo caso il disco della nostra Galassia) è molto più breve del tempo necessario ad accelerare sufficientemente le particelle cosmiche. Per spiegare le alte energie delle particelle che compongono la radiazione cosmica bisogna quindi ipotizzare l'esistenza di un meccanismo di accelerazione molto più efficace di quello proposto da Fermi.

La soluzione a questo problema venne proposta indipendentemente da quattro diversi gruppi di ricercatori alla fine degli anni '70 (si veda [8] per un articolo di rassegna). L'idea proposta è, in buona sostanza, una variazione del meccanismo di Fermi. Per rendere questo meccanismo

più efficace, basta ipotizzare che i raggi cosmici subiscano solamente collisioni frontali. Tornando all'analogia proposta nel capitolo precedente, questo equivarrebbe a considerare una pallina da tennis intrappolata tra due racchette in moto l'una verso l'altra. In questo caso, solo collisioni frontali sono possibili e la pallina guadagna energia ogni volta che rimbalza su una racchetta.

Considerare solo collisioni frontali significa introdurre un meccanismo di Fermi al primo ordine, molto più efficace, in quanto l'incremento di energia per collisione frontale è dominato dal termine  $V/c$ , e non da  $(V/c)^2$ . Questo risultato può essere facilmente derivato nel caso di particelle non-relativistiche (si veda il riquadro), imponendo  $v \gg V$  e  $v \sim c$ :

$$\frac{\Delta E_+}{E} \sim \frac{V}{c^2}(V+c) \approx \left(\frac{V}{c}\right) + \left(\frac{V}{c}\right)^2 \quad (2)$$

dove abbiamo trascurato i piccoli fattori numerici moltiplicativi. In questo caso, il numero di collisioni necessarie per cambiare significativamente l'energia di una particella è dell'ordine di  $\approx (V/c)^{-1} \sim 300 (V/100 \text{ km/s})^{-1}$

Esistono oggetti astrofisici nei quali il meccanismo di Fermi al primo ordine possa operare? Fortunatamente, la risposta è sì: le onde d'urto che si formano in plasmi astrofisici magnetizzati sono infatti acceleratori di particelle molto efficienti.

## L'accelerazione diffusiva in onde d'urto

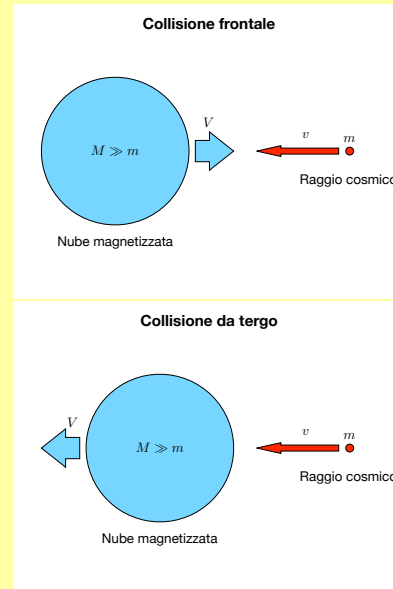
La velocità del suono  $c_s$  definisce la velocità massima alla quale una informazione può essere comunicata da un punto all'altro di un mezzo per via meccanica (per esempio in un plasma astrofisico). Le onde d'urto si formano quando una perturbazione si muove in un mezzo a una velocità supersonica.

Quando questo avviene, una discontinuità appare nel plasma, a dividere il volume occupato dal mezzo imperturbato (a monte dell'onda d'urto, o *upstream*) da quello perturbato (a valle dell'onda d'urto, o *downstream*).

Attraversando la discontinuità si registrano forti variazioni della pressione, temperatura, densità e velocità del mezzo.

## Il meccanismo di Fermi per l'accelerazione dei raggi cosmici

Il 4 dicembre 1948, Enrico Fermi riempì di calcoli quattro pagine del suo quaderno, gettando le basi della teoria per l'accelerazione dei raggi cosmici. Questa teoria, nota oggi come **meccanismo di Fermi**, è tuttora il punto di partenza di numerosissimi studi sull'accelerazione dei raggi cosmici. Fermi considerò inizialmente particelle non-relativistiche, caratterizzate cioè da velocità  $v$  molto inferiori a quella della luce. Inoltre, distinse due tipi di collisioni elastiche tra particelle di massa  $m$  e nubi magnetizzate di massa  $M \gg m$  e velocità  $V$ : le collisioni **frontali**, nelle quali la particella e la nube si muovono in direzioni opposte prima della collisione, e quelle **da tergo**, nelle quali la particella insegue la nube.



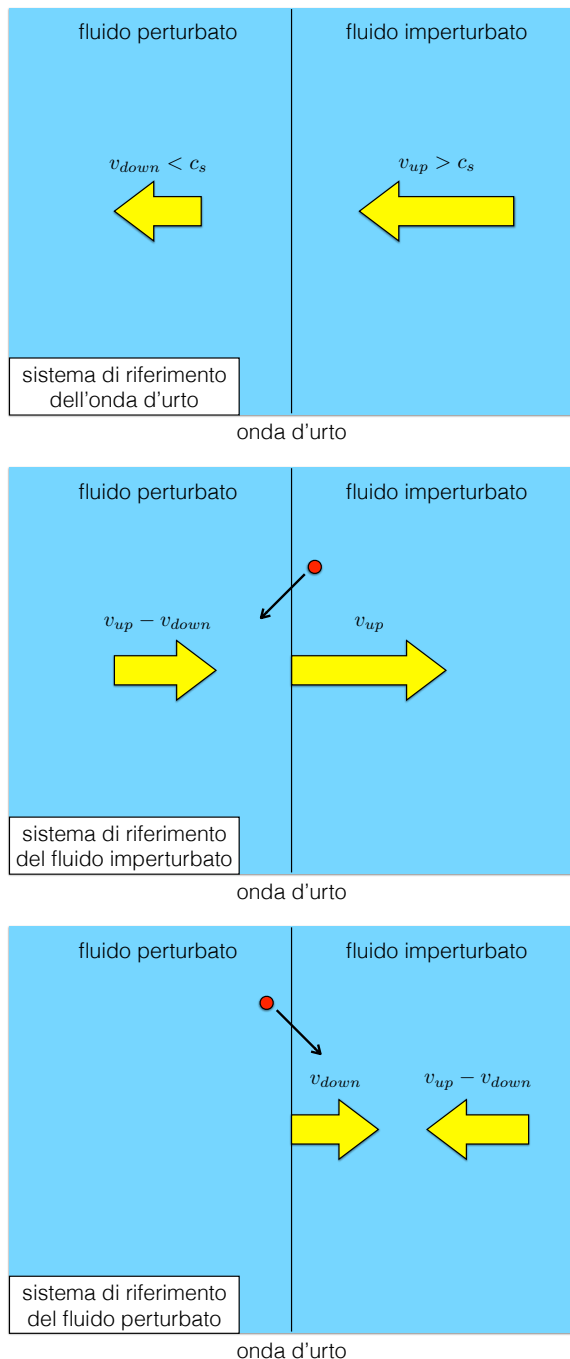
Nel sistema di riferimento nel quale la nube è a riposo, la velocità della particella sarà  $v \pm V$  (il segno + si riferisce a collisioni frontali, il - a collisioni da tergo). In quel sistema di riferimento, a seguito della collisione la particella inverte semplicemente la direzione di moto. Ne segue che, nel sistema di riferimento dell'osservatore, l'energia cinetica della particella cambierà da  $E_1 = mv^2/2$  a  $E_2 = m(v \pm 2V)^2/2$ . La variazione relativa di energia per collisione è quindi:

$$\frac{\Delta E_{\pm}}{E} = \frac{E_2 - E_1}{E_1} = \frac{4V}{v^2}(V \pm v)$$

Dal momento che  $v \gg V$  (i raggi cosmici si muovono più velocemente delle nubi interstellari), le particelle guadagnano energia a seguito di collisioni frontali ( $\Delta E_+ > 0$ ), mentre ne perdono in collisioni da tergo ( $\Delta E_- < 0$ ). Bisogna considerare, però, che le collisioni frontali avvengono a una frequenza  $\nu_+ = (v + V)/L$  maggiore di quella alla quale avvengono le collisioni da tergo,  $\nu_- = (v - V)/L$ , dove  $L$  è la distanza caratteristica tra le nubi. La probabilità di avere collisioni frontali o da tergo è quindi  $P_{\pm} = (v \pm V)/2v$  e la variazione media di energia per collisione è:

$$\left\langle \frac{\Delta E}{E} \right\rangle = \frac{\Delta E_+}{E} P_+ + \frac{\Delta E_-}{E} P_- = 8 \left( \frac{V}{v} \right)^2 > 0$$

Le particelle, quindi, guadagnano energia! [ Ponendo  $v \sim c$  (i raggi cosmici sono relativistici) e mediando su tutti i possibili angoli tra  $v$  e  $V$  si ottiene il risultato esatto:  $\langle \Delta E/E \rangle = (4/3)(V/c)^2$ .]



**Figura 4:** *Onda d'urto piana vista dal sistema di riferimento in cui la discontinuità (pannello superiore), il plasma a monte (pannello centrale) e a valle dell'onda d'urto (pannello inferiore) sono a riposo. Il punto rosso rappresenta un raggio cosmico che attraversa l'onda d'urto.*

Per semplicità, consideriamo una discontinuità piana che si muova in un plasma omogeneo a una velocità costante  $V$ . Spesso, è conveniente studiare le onde d'urto nel sistema di riferimento nel quale la discontinuità è a riposo (si veda il pannello superiore della Fig. 4). In quel sistema di riferimento il gas a monte della discontinuità si

avvicinerà ad essa con una velocità supersonica  $v_{up} = V$ . Il plasma, attraversando la superficie di discontinuità viene compresso e riscaldato, e si allontana a valle dell'onda d'urto a una velocità subsonica  $v_{down} < v_{up}$  (si veda [9] per una trattazione dettagliata delle onde d'urto).

Immaginiamo ora che il plasma nel quale propaga l'onda d'urto sia strutturato in nuvolette magnetizzate, proprio come nello scenario descritto da Fermi nel suo importante lavoro sull'accelerazione dei raggi cosmici. Assumiamo inoltre che queste nuvolette magnetizzate si muovano in maniera solidale con il plasma, ovvero che tutte le nuvolette a monte della discontinuità si muovano verso di essa a una velocità  $v_{up}$ , e tutte quelle a valle della discontinuità si allontanino da essa a una velocità  $v_{down}$ . A questo punto, è utile considerare il problema nel sistema di riferimento nel quale il plasma a monte della discontinuità è a riposo (pannello centrale in Fig. 4). In questo sistema di riferimento le nuvolette magnetizzate che si trovano a monte della discontinuità saranno anch'esse a riposo, mentre la discontinuità sarà in moto verso destra con velocità  $v_{up}$ . In queste circostanze, le collisioni tra queste nuvolette (che sono a riposo) e un raggio cosmico hanno come unico effetto quello di cambiare la direzione di moto del raggio cosmico, lasciando invariata la propria energia.

Consideriamo ora un raggio cosmico che, dopo un certo numero di collisioni con nuvolette magnetizzate, attraversi la discontinuità e passi a valle dell'onda d'urto (pannello centrale in Fig. 4). Il raggio cosmico vedrà le nuvolette a valle dello shock venirgli incontro a una velocità  $v_{up} - v_{down}$ .

Passiamo ora al sistema di riferimento dove il plasma a valle della discontinuità è a riposo (pannello inferiore in Fig. 4). In questo sistema di riferimento, le nuvolette magnetizzate a valle della discontinuità saranno a riposo, e la discontinuità si muoverà verso destra a una velocità  $v_{down}$ . Inoltre, le collisioni tra un raggio cosmico e le nuvolette (a riposo) lasceranno inalterata l'energia della particella. Un raggio cosmico che, dopo diverse collisioni, riattraversi la discontinuità per ritornare a monte dell'onda d'urto vedrà le nuvolette a valle dello shock venirgli incontro a una velocità  $v_{up} - v_{down}$ , esattamente come nel passaggio da monte a valle dell'onda



d'urto descritto sopra.

Riassumendo: un raggio cosmico che attraversa la discontinuità (poco importa se da monte a valle o viceversa) vedrà invariabilmente una nuvoletta magnetizzata corrergli incontro a una velocità  $v_{up} - v_{down}$ . Questo significa che ad ogni ciclo attorno all'onda d'urto (monte  $\rightarrow$  valle  $\rightarrow$  monte, o valle  $\rightarrow$  monte  $\rightarrow$  valle) il nostro raggio cosmico subirà una collisione frontale e guadagnerà energia! Ne segue che una particella che esegua innumerevoli cicli attorno alla discontinuità sarà soggetta a un meccanismo di accelerazione di Fermi al primo ordine, e aumenterà rapidamente la propria energia.



**Figura 5:** Il resto di una supernova esplosa nell'anno 1006, come è stata osservata nelle onde radio (rosso), nei raggi X (blu) e nella radiazione visibile (giallo). Immagine da *Astronomy Picture of the Day*.

Il meccanismo di accelerazione diffusiva ad onde d'urto è stato verificato in varie osservazioni, e ci sono quindi pochi dubbi sul fatto che sia operativo in un gran numero di sorgenti astrofisiche. Strumenti a bordo di sonde spaziali ci hanno permesso di rivelare *in situ* la presenza di particelle accelerate in onde d'urto interplanetarie, ed osservazioni dell'emissione prodotta da particelle energetiche proveniente da resti di supernove dimostrano che queste onde d'urto sferiche in espansione sono in grado di accelerare raggi cosmici (si veda ad esempio Fig. 5). Come abbiamo già avuto modo di discutere (si veda la discussione relativa alla Fig. 3), la combinazione

di campo magnetico e dimensione dei resti di supernova li rende incapaci di accelerare particelle fino alla massima energia osservata nei raggi cosmici. Una delle possibilità è che l'accelerazione di queste particelle di energia estrema possa essere prodotta da onde d'urto relativistiche, ovvero in moto a velocità vicinissime a quella della luce. Queste onde d'urto si formano nelle esplosioni che originano i lampi gamma, o a seguito di eventi eruttivi che avvengono frequentemente nei nuclei di galassie attive.

La spiegazione dell'origine dei raggi cosmici di energia altissima resta un mistero. Ma la soluzione di questo mistero potrebbe essere non troppo lontana.



- [1] V. L. Fitch, *Elementary particle physics: The origins*, *Reviews of Modern Physics*, 71 (1999) S25.
- [2] B. Rossi, *I raggi cosmici*, Einaudi, Torino (1971).
- [3] S. Gabici, *Raggi Cosmici*, RCS MediaGroup (2019).
- [4] A. de Angelis, *L'enigma dei raggi cosmici*, Springer, Milano (2011).
- [5] J. Linsley, *Search for the end of the cosmic ray energy spectrum*, *AIP Conference Proceedings*, 433 (1998) 1.
- [6] A. M. Hillas, *The Origin of Ultra-High-Energy Cosmic Rays*, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 22 (1984) 425.
- [7] E. Fermi, *On the Origin of the Cosmic Radiation*, *Physical Review*, 75 (1949) 1169.
- [8] L. O'C. Drury, *An introduction to the theory of diffusive shock acceleration of energetic particles in tenuous plasmas*, *Reports on Progress in Physics*, 46 (1983) 973.
- [9] F. H. Shu, *The physics of astrophysics. Volume II: Gas dynamics*, University Science Books, Sausalito (1992)
- [10] B. Achterberg, *Cosmic Accelerators*, Lecture notes for the IAC2008, [http://www.rci.uct.ac.za/sites/default/files/image\\_tool/images/395/Course\\_Resources/Pieter\\_Meintjies/ba-lecture.pdf](http://www.rci.uct.ac.za/sites/default/files/image_tool/images/395/Course_Resources/Pieter_Meintjies/ba-lecture.pdf)



**Stefano Gabici:** è ricercatore al laboratorio AstroParticelle e Cosmologia (APC) di Parigi. Si occupa di raggi cosmici e di astronomia nei raggi gamma.

