

Una pioggia energetica

L'origine dei raggi cosmici

di Pasquale Blasi

In una sera d'estate, lontano dalle luci della città, il cielo stellato ci dà una sensazione di tranquillità che sembra contrastare con l'ansia che di solito ci è trasmessa dal buio della notte. Si tratta però di una tranquillità ingannevole: in uno storico volo in pallone nell'estate del 1911, Victor Hess svelò che la Terra è continuamente bombardata da una pioggia di particelle di alta energia di natura non solo extraterrestre ma, come fu chiaro molto tempo dopo, originate in eventi violenti nella via Lattea. Queste particelle, ora note come raggi cosmici,

hanno un ampio spettro di energie e si muovono a velocità prossime a quella della luce. Oggi sappiamo che si tratta principalmente di protoni (nuclei di atomi di idrogeno) e nuclei di elio, prodotti in gigantesche esplosioni, che forniscono le enormi energie necessarie per produrli. Ciascun raggio cosmico che colpisce la Terra porta con sé un'energia che è da milioni a centinaia di miliardi di miliardi di volte quella dei fotoni del nostro Sole, che hanno energia media di qualche eV (vd. p. 24, ndr). Dove sono prodotti questi raggi cosmici e in che

modo? Ci possono aiutare a sondare i limiti della fisica che conosciamo?

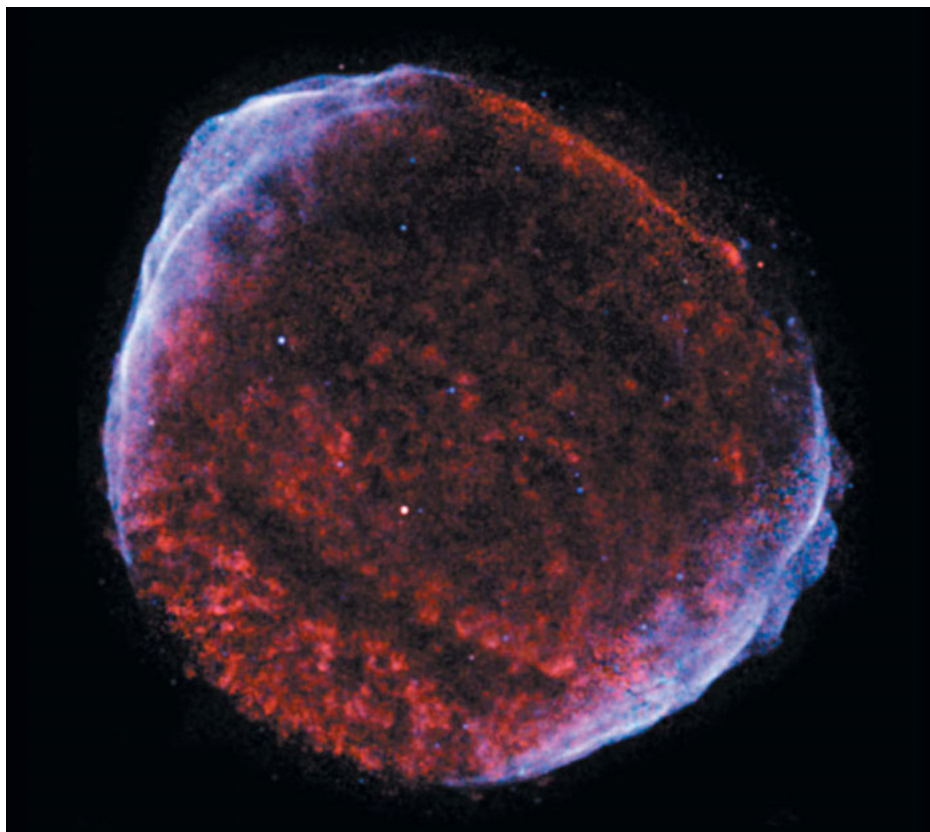
Qui sulla Terra abbiamo imparato che possiamo accelerare particelle con carica elettrica, come elettroni e protoni, facendole passare attraverso campi elettrici. In un acceleratore di particelle come Lhc, un campo magnetico forza le particelle a percorrere delle traiettorie approssimativamente circolari in un enorme anello così che lo stesso campo elettrico venga attraversato molte volte e l'energia delle particelle continui ad aumentare. Man mano che l'energia aumenta diventa più difficile curvare le traiettorie, e quindi l'energia massima che le particelle possono acquisire nell'acceleratore è determinata dalla dimensione dell'acceleratore. L'energia massima raggiunta in Lhc (di circa 10^4 GeV) è un decimilionesimo dell'energia più alta misurata nei raggi cosmici (circa 10^{11} GeV). Come fa la Natura a ottenere un effetto di gran lunga maggiore senza usare le gigantesche macchine che noi abbiamo costruito sulla Terra?

Ben lungi dalla tranquillità del nostro cielo stellato, gran parte dei raggi cosmici sono accelerati in eventi catastrofici, noti come "supernovae", che segnano la fase finale della vita di una stella.

Queste esplosioni liberano in un tempo brevissimo mille volte più energia di quanta il Sole ne avrà prodotta nella sua intera esistenza di 10 miliardi di anni.



a.
Victor Hess mentre si prepara a effettuare uno dei voli in pallone che portarono alla scoperta dell'origine cosmica della radiazione ionizzante (circa 1911).



b.
Immagine del resto di supernova SN 1006 acquisita con il satellite Chandra. Il colore rosso indica le emissioni X prodotte da gas ad altissima temperatura (milioni di gradi) e i colori blu e viola indicano la presenza di raggi X prodotti dall'accelerazione di elettroni. SN1006 è un candidato anche per l'accelerazione di protoni e nuclei.

La maggior parte di questa energia è trasportata da neutrini - aventi energie di qualche decina di milioni di eV - ma un centesimo circa viene trasformata in energia cinetica del gas espulso nell'esplosione. Questo gas si muove a circa 10.000 km al secondo attraverso il mezzo interstellare, circa mille volte più veloce del suono in quel mezzo, creando così un'onda d'urto che si espande e trascina tutto quel che incontra sul suo cammino. Possono passare migliaia di anni prima che l'inerzia del materiale accumulato dall'onda d'urto fermi l'espansione, lasciando nel cielo quelli che chiamiamo "resti di supernova", dei grandi anelli di gas che tipicamente emettono onde radio a celebrare la morte di una stella un tempo brillante. Le onde d'urto generate in un'esplosione di supernova sono siti dove i raggi cosmici possono essere accelerati grazie a un meccanismo noto, un po' impropriamente, come "accelerazione di Fermi", in onore del fisico italiano che fu il primo a descrivere un meccanismo di accelerazione statistico (vd. approfondimento a p. 19). Il campo elettrico necessario per

dare energia alle particelle è, nel caso di un'onda d'urto, dovuto a una conseguenza della relatività di Einstein: se un osservatore misura un campo magnetico, un altro osservatore in moto rispetto al primo misura anche un campo elettrico. La differenza di velocità fra il gas sui due lati dell'onda d'urto fa sì che vi sia un campo elettrico a cui le particelle elettricamente cariche reagiscono se attraversano la superficie dell'onda. L'aumento dell'energia in tale attraversamento è però piuttosto piccolo, e perché l'energia aumenti in modo considerevole è necessario che vi siano molti attraversamenti. Questo può avvenire grazie al fatto che i raggi cosmici si muovono in modo diffusivo (moto browniano) nel campo magnetico, così che rimangono attorno all'onda d'urto per tempi più lunghi. Così come per Lhc, l'energia massima raggiungibile è (almeno in parte) determinata dalla dimensione finita dell'onda d'urto. Si pensa che questo meccanismo possa spiegare la gran parte dei raggi cosmici osservati a terra, e parziale conferma di questo ci viene dalla rivelazione della radiazione gamma prodotta dagli "acceleratori cosmici" (cioè le sorgenti

astrofisiche che accelerano i raggi cosmici). Le interazioni di raggi cosmici con il gas interstellare danno infatti luogo alla generazione di pioni neutri e carichi, che decadendo producono radiazione gamma e neutrini. Per avere la certezza che le supernovae siano in grado di accelerare fino alle energie osservate nei raggi cosmici dovremo forse aspettare i nuovi dati del prossimo telescopio gamma, Cta (Cherenkov Telescope Array), che è ora in fase di costruzione e, in futuro, dei telescopi per neutrini Icecube e Km3net (vd. in Asimmetrie n. 15 p. 15, ndr).

Il viaggio dei raggi cosmici dalle loro sorgenti sino a noi è anch'esso un moto diffusivo attraverso i campi magnetici galattici e intergalattici. Le misure più recenti realizzate con Ams-02 sulla stazione spaziale internazionale orbitante ci hanno fornito informazioni preziose su questo viaggio. Durante questo viaggio i raggi cosmici subiscono diverse reazioni nucleari che portano alla produzione di nuclei secondari - come il boro - e di radiazione gamma e di antimateria, osservate dagli esperimenti Pamela e Ams-02 (vd. in Asimmetrie n. 18 p. 26, ndr.). La misura dell'eccesso di positroni conferma la presenza di sorgenti aggiuntive di antimateria: le pulsar, stelle di neutroni rapidamente rotanti capaci di produrre copiosamente positroni, potrebbero essere ottimi candidati. La comunità sta anche studiando possibili anomalie sul flusso di antiprotoni che potrebbero risultare cruciali per il futuro della fisica dei raggi cosmici.

I raggi cosmici osservati a terra raggiungono energie circa 100 miliardi di volte più alte della massa a riposo di un protone (che è pari a 1 GeV), un'energia inimmaginabile da produrre

in un laboratorio terrestre. E in realtà non è facile capire come la natura stessa riesca a compiere questo prodigio. Il flusso di queste particelle che raggiunge la Terra è bassissimo, meno di una particella al km² al secolo, ed è per questo che la loro rivelazione richiede esperimenti di dimensioni gigantesche, come il telescopio Auger, che copre una superficie di circa 3000 km² nella Pampa argentina. Persino l'intera nostra Galassia è troppo piccola per confinare magneticamente particelle di tale energia: le loro sorgenti vanno perciò cercate al di fuori del nostro quartiere cosmico.

A energie superiori a circa 10²⁰ eV, i raggi cosmici perdono gran parte della loro energia interagendo con la radiazione cosmica di fondo, residuo del Big Bang. Quest'ultimo processo - noto come effetto "gzk" dalle iniziali dei fisici Greisen, Zatsepin e Kuz'min che lo descrissero per primi - riduce drasticamente la probabilità che i raggi cosmici di energia estrema raggiungano la Terra da distanze superiori a circa 10 milioni di anni luce, il che si riflette in una drastica riduzione del loro flusso.

Un utile strumento per valutare quali siano

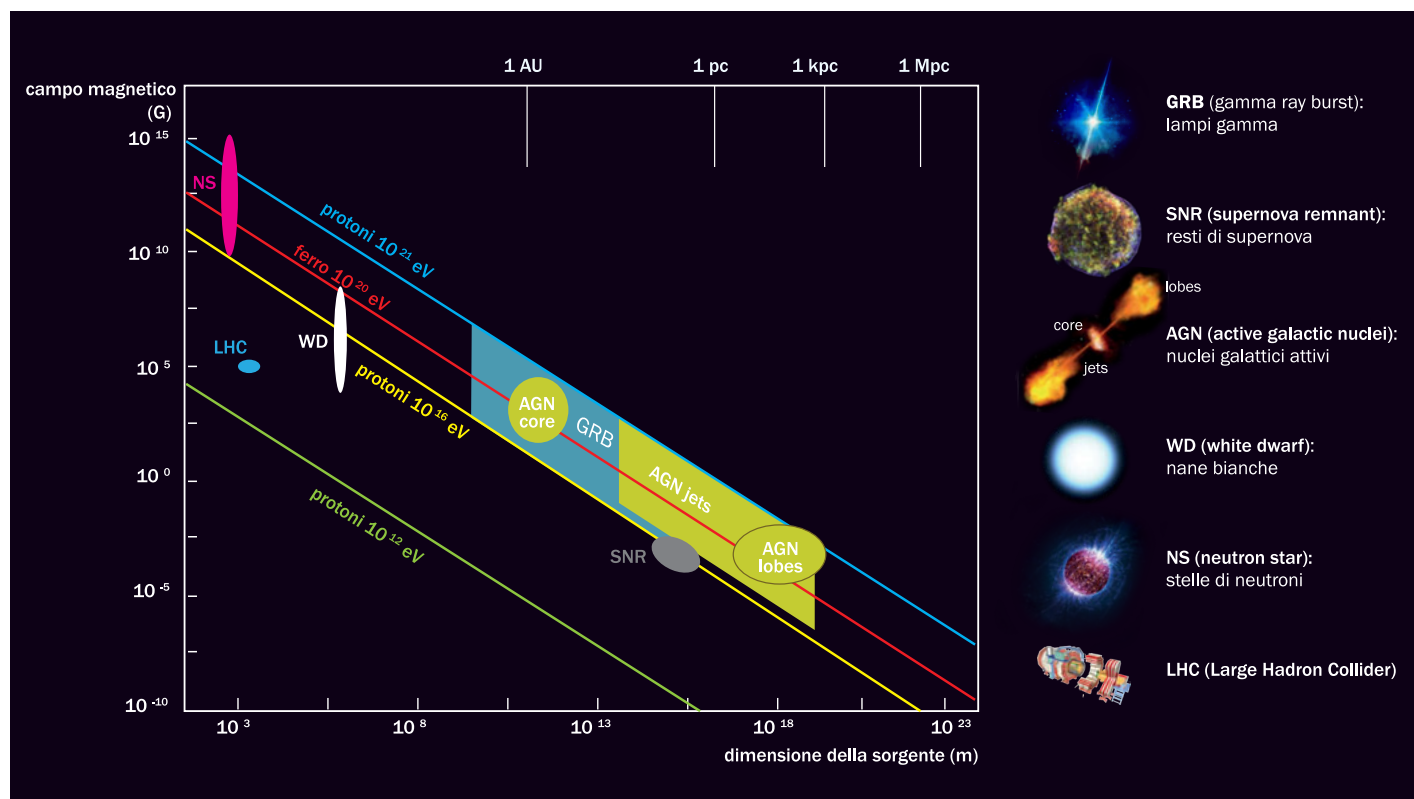
le possibili sorgenti dei raggi cosmici di energia estrema è il cosiddetto diagramma di Hillas (vd. fig. c). Come per gli acceleratori di particelle di costruzione umana, anche per gli acceleratori cosmici l'energia massima che le particelle possono raggiungere è funzione della dimensione della sorgente e del suo campo magnetico. Per accelerare le particelle di altissima energia osservate a terra, occorre cercare sorgenti molto estese o con campi magnetici relativamente alti. Fra gli indiziati ci sono le galassie attive, che ospitano buchi neri di massa miliardi di volte quella del nostro Sole, i lampi gamma e giovanissime stelle di neutroni rapidamente ruotanti. I dettagli dei meccanismi di accelerazione sino alle estreme energie osservate sono tutt'altro che chiari.

La natura extra-galattica dei raggi cosmici di altissima energia è stata recentemente confermata dalla misura dell'anisotropia delle direzioni di arrivo di queste particelle, simile a un dipolo, effettuata dall'osservatorio Pierre Auger. Tali misure hanno anche rivelato che alle energie più alte i raggi cosmici sembrano essere composti principalmente da nuclei pesanti e non da idrogeno, un risultato un po' inatteso che la comunità sta ancora studiando.

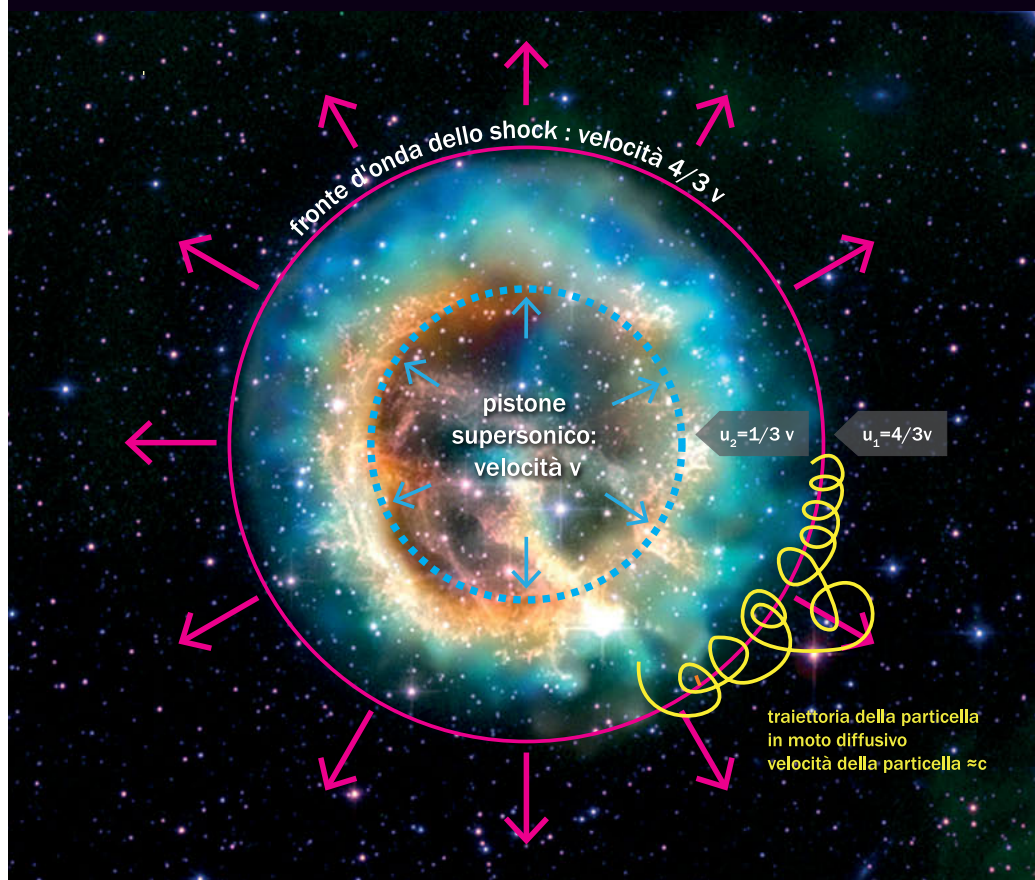
c.

Il diagramma di Hillas permette di identificare, con buona approssimazione, le classi di sorgenti candidate per la produzione di raggi cosmici di alta energia, secondo una relazione che lega il campo magnetico, espresso in Gauss, e le dimensioni della sorgente, in metri, all'energia massima raggiungibile dai raggi cosmici prodotti in quell'ambiente astrofisico. Le rette in figura delimitano i semipiani alla destra dei quali l'accelerazione di particelle di una data energia è possibile; sono inoltre indicate le sorgenti che hanno le caratteristiche fisiche per accelerare tali particelle.

In ascissa sono anche riportate le unità di misura delle distanze comunemente usate in astrofisica: 1AU (unità astronomica), corrispondente alla distanza Terra-Sole pari a circa $1,5 \times 10^{11}$ m; 1 pc (parsec) corrispondente a circa $3,1 \times 10^{16}$ m (cioè 3,26 anni luce) e i suoi multipli, il kiloparsec (10³ pc) e il megaparsec (10⁶ pc). Per confronto sono inseriti i parametri di Lhc, che accelera particelle fino a energie di circa 10 TeV.



L'accelerazione di Fermi



1.

L'esplosione di una supernova genera un'onda d'urto nel gas interstellare. La massa espulsa preme sul gas come un pistone supersonico che si muove a velocità v , molto minore della velocità della luce c , ma maggiore della velocità del suono nel mezzo. Seduti sul fronte dell'onda d'urto, che si propaga con velocità $4/3 v$, il mezzo interstellare ci viene incontro a velocità u_1 e rallenta a velocità u_2 dopo aver attraversato il fronte. Il moto diffusivo delle particelle all'interno del gas, dovuto alla presenza di campi magnetici, consente di attraversare il fronte d'onda diverse volte prima che le particelle siano trasportate via. Ad ogni attraversamento la particella guadagna un'energia proporzionale alla sua energia iniziale moltiplicata per $4/3 v/c$. Poiché le velocità u_1 e u_2 sono tutte molto minori della velocità della luce c , il guadagno energetico è molto piccolo e sono necessari moltissimi attraversamenti prima che la particella acquisti le enormi energie rivelate a terra.

I meccanismi di accelerazione astrofisici permettono la conversione dell'energia cinetica di una massa macroscopica - ad esempio un plasma formato da protoni ed elettroni - nell'energia di poche particelle presenti all'interno dello stesso plasma che però non rimangono in equilibrio termico con esso. Il cosiddetto "meccanismo di Fermi" rappresenta il caso meglio studiato. Esso ha luogo quando un plasma è investito da un'onda d'urto, come quelle prodotte dalle esplosioni di supernova.

Se fossimo seduti sul fronte dell'onda d'urto, vedremmo il mezzo interstellare - tipicamente formato da atomi di idrogeno - arrivarci incontro a velocità $u_1 = 4/3 v$, dove v è la velocità della massa espulsa, che agisce come un "pistone supersonico", e allontanarsi dal lato opposto, con velocità $u_2 = 1/3 v$, rallentato e riscaldato. Parte dell'energia cinetica del gas investito dall'onda d'urto viene infatti trasformata in energia termica. Alcune delle particelle cariche che attraversano il fronte dell'onda d'urto riescono, nel loro moto diffusivo, a tornare dall'altro lato.

Nel passaggio tra le due regioni le particelle guadagnano energia, accelerate dal campo elettrico prodotto (come predetto dalla relatività) dai campi magnetici presenti nei plasmi sui due lati del fronte d'onda. Se l'onda d'urto si muove con velocità molto minore di quella della luce, il guadagno di energia è piccolo e richiede molti passaggi delle particelle attraverso il fronte d'onda affinché si raggiungano le alte energie osservate nei raggi cosmici.

L'energia conferita alle particelle accelerate viene sottratta al moto ordinato del gas che attraversa l'onda, un po' come accade per il riscaldamento. Si è compreso di recente che il moto delle particelle accelerate attorno alla superficie dell'onda d'urto provoca esso stesso delle perturbazioni del campo magnetico capaci di intrappolare i raggi cosmici nell'acceleratore e rendere l'accelerazione più efficace. Il fenomeno di accelerazione è intrinsecamente non-lineare, nel senso che i raggi cosmici modificano l'ambiente in cui vengono accelerati.

Biografia

Pasquale Blasi è professore presso il Gran Sasso Science Institute, centro di studi avanzati de L'Aquila. Membro del Comitato Editoriale della rivista *Astroparticle Physics*, membro della commissione C4 della International Union for Pure and Applied Physics (IUPAP). Ha fatto ricerca presso l'Università di Chicago e presso il Fermilab. Dal 2001 al 2017 è stato ricercatore dell'Inaf - Osservatorio Astrofisico di Arcetri. Nel 2003 gli è stato conferito il premio Shakti P. Duggal per il suo lavoro sull'origine dei raggi cosmici.

DOI: 10.23801/asimmetrie.2018.24.4