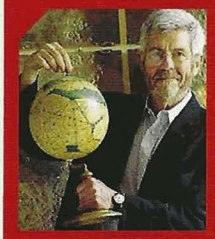


Giovanni F. Bignami
Presidente INAF,
Presidente COSPAR

COME CAVARE SANGUE da una stella esplosa

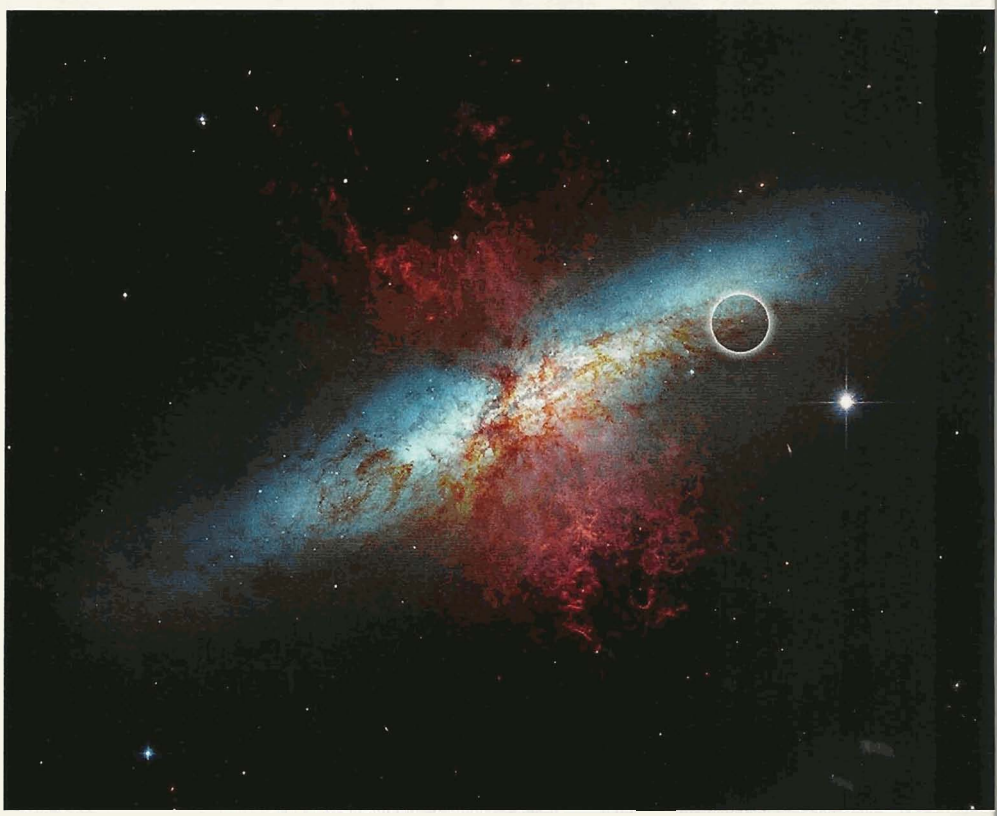
Osservata in diretta la produzione di ferro in una supernova

È noto che non si può cavare sangue da una rapa, ma adesso sappiamo che da una stella invece si può. Più precisamente, dalla esplosione di una stella. Il nostro sangue è rosso perché contiene ferro, essenziale per il trasporto di ossigeno dai polmoni ai tessuti. Sappiamo anche che si tratta degli stessi atomi di ferro che formano una spada o una pentola. Una splendida osservazione del satellite europeo Integral, lanciato nel 2002 dall'ESA e costruito con forte partecipazione italiana, soprattutto INAF, ci mostra adesso che il ferro nasce in cielo. Lo abbiamo visto apparire nel cuore di una supernova, la gigantesca esplosione con la quale una stella può concludere la sua vita.

Che gli elementi dei quali siamo fatti, dal carbonio, ossigeno e azoto dei tessuti al calcio delle ossa, siano prodotti nelle stelle, lo sappiamo da quando abbiamo capito la fusione termonucleare, per esempio quella che avviene tutti i giorni nel Sole. Già nel 1958 l'aveva raccontato, e in modo splendido, al grande pubblico Harlow Shapley, nel suo *"Of Stars and Men"*, tradotto magistralmente in italiano da Livio Gratton, che ne curò anche una bella prefazione, in una edizione Mondadori oggi purtroppo introvabile.

Nel cuore del Sole, i nuclei più leggeri, partendo dall'idrogeno, si fondono per formare quelli un po' più pesanti, tipo elio, carbonio, azoto e così via. La fusione regala anche tantissima energia, quella, per intenderci, che sappiamo utilizzare in una bomba (quella all'idrogeno, appunto), e che vorremmo sfruttare in una centrale termonucleare a fusione, ma non siamo ancora capaci. È l'energia che tiene acceso il Sole e che perciò ci permette di vivere, giorno dopo giorno.

Fin qui tutto chiaro: noi, che siamo polvere di stelle, abbiamo il calcio nelle ossa perché l'ha fatto una stella come il Sole, e così via. Ma le cose si complicano considerando gli elementi più pesanti, come appunto il ferro, o addirittura l'oro o l'uranio, che pure esistono in natura. Infatti, proprio a partire dal ferro (ricordiamo, Z=26), la formazione degli elementi non produce più energia, ma ne richiede: per costruire il ferro e gli altri elementi più pesanti bisogna fornire al materiale stellare una grande quantità di energia, ben di più di quanta ne produca un Sole qualunque. Insomma, ci vuole una supernova, che ci dia la terza forma di nucleosintesi oggi conosciuta, la nucleosintesi esplosiva, che viene dopo quella stellare "classica", appunto fino al ferro. Prima ancora, c'era stata quella "cosmologica", nei primi tre minuti dopo il Big Bang, che si ferma ai primi leggerissimi elementi dopo l'idrogeno: elio o litio. Per completezza, aggiungiamo che da qualche decina di anni *Homo sapiens* ha aggiunto alle tre forme naturali di nucleosintesi una quarta, quella artificiale, che crea elementi transuranici, finora non osservati in natura.



M82, la "galassia sigaro" nella costellazione dell'Orsa Maggiore. Nel cerchietto l'indicazione della regione della galassia dove è apparsa la supernova SN2014j.

La sera del 21 gennaio scorso, Steve Fossey, astronomo inglese dell'*University College* di Londra, stava mostrando ai suoi studenti l'immagine, appena presa, di una galassia particolarmente spettacolare, M82. Come la nostra, anche M82 contiene centinaia di miliardi di stelle che sono invisibili una per una, semplicemente perché la galassia è troppo lontana. Le stelle formano quindi un chiarore lattiginoso, da cui il nome galassia.

L'astronomo notò immediatamente che, invece, nella parte esterna della galassia, una "stella" era ben visibile come un puntino brillante sul fondo lattiginoso di stelle indistinte, "puntino" che non c'era in altre immagini dello stesso oggetto. Non poteva che essere una stella temporaneamente molto più luminosa delle altre, cioè una supernova, la gigantesca esplosione che emette un picco di luce pari a miliardi di volte quella del Sole.

Abbiamo imparato che nel cosmo ci sono due classi principali di supernovae: quelle che acquistano la loro energia dal collasso gravitazionale delle loro stelle progenitrici e quelle la cui energia proviene da catastrofici processi di fusione termonucleare nelle stelle. Queste ultime prendono il nome di "Tipo Ia" e quella scoperta da Fossey, denominata SN2014J, appartiene a quella classe. Le esplosioni di Tipo Ia impiegano circa tre settimane per raggiungere il valore massimo della loro luminosità, che arriva allo sbalorditivo valore di 4 miliardi di volte quella del nostro Sole, per poi scemare progressivamente più o meno con la stessa rapidità. Come è facile immaginare, il loro potentissimo bagliore le rende visibili fino ad enormi distanze. Sfruttando anche l'ulteriore, importantissima caratteristica che queste esplosioni hanno tutte una luminosità intrinseca confinata in uno stretto intervallo di valori, le supernovae Ia sono impiegate da anni dagli astronomi come preziosi "metri cosmici" ovvero "candele standard", utilizzabili per misurare le distanze nell'universo con una precisione niente male. Ed è proprio grazie a osservazioni delle supernovae Ia che Saul Perlmutter, Brian Schmidt e Adam Reiss hanno vinto nel 2011 il Premio Nobel per la Fisica, avendo scoperto la sorprendente proprietà che l'Universo sta accelerando la sua velocità di espansione.

Tuttavia, l'idea fondamentale che queste esplosioni di supernovae vengano innescate dalla repentina fusione nucleare del carbonio presente in una nana bianca non era mai stata confermata direttamente. La nostra migliore visione degli eventi che portano all'accensione di una supernova Ia ci racconta questa storia. Quando una qualunque stella, di taglia simile al Sole, in qualunque angolo dell'universo, si avvicina alla fine del suo ciclo evolutivo, perde i suoi strati più esterni (che vanno a costituire una nebulosa planetaria) e contemporaneamente vede il suo nucleo contrarsi e addensarsi, per diventare poi una nana bianca.

Per farla breve, una nana bianca è un oggetto della massa del Sole concentrata in un volume pari a quello della Terra. Lasciate al loro destino, le nane bianche non hanno un'esistenza molto eclatante, visto che al loro interno rimane solo una gran quantità di materia iperdensa e molto calda. Densità, temperatura e composizione chimica nel nucleo delle nane bianche non hanno infatti valori sufficienti per riaccendere la fornace termonucleare, e così queste sfere incandescenti sono destinate, seppur lentamente, a raffreddarsi e ad affievolirsi, fino a scomparire nel buio e nel freddo cosmico. C'è però ancora qualche chance per alcune di esse per finire la loro esistenza in un modo davvero memorabile. Se, ad esempio, la nana bianca aumenta la sua massa catturandola da una stella compagna o perché viene ad impattare un altro oggetto del suo stesso tipo, può raggiungere un valore critico per cui la spinta implosiva della gravitazione torna a sovrastare la forza di resistenza esercitata dal carbonio presente nel suo nucleo. È l'inizio della catastrofe: il nucleo stellare viene ulteriormente compresso fino a che si innesca la fusione termonucleare del carbonio. E questo processo avviene – letteralmente – in un lampo, propagandosi velocemente in tutta la nana bianca e forgiando gli elementi chimici più pesanti del carbonio, fino ad arrivare a quello con il nucleo più strettamente legato, ovvero il nichel-56, nel gruppo vicino al ferro.

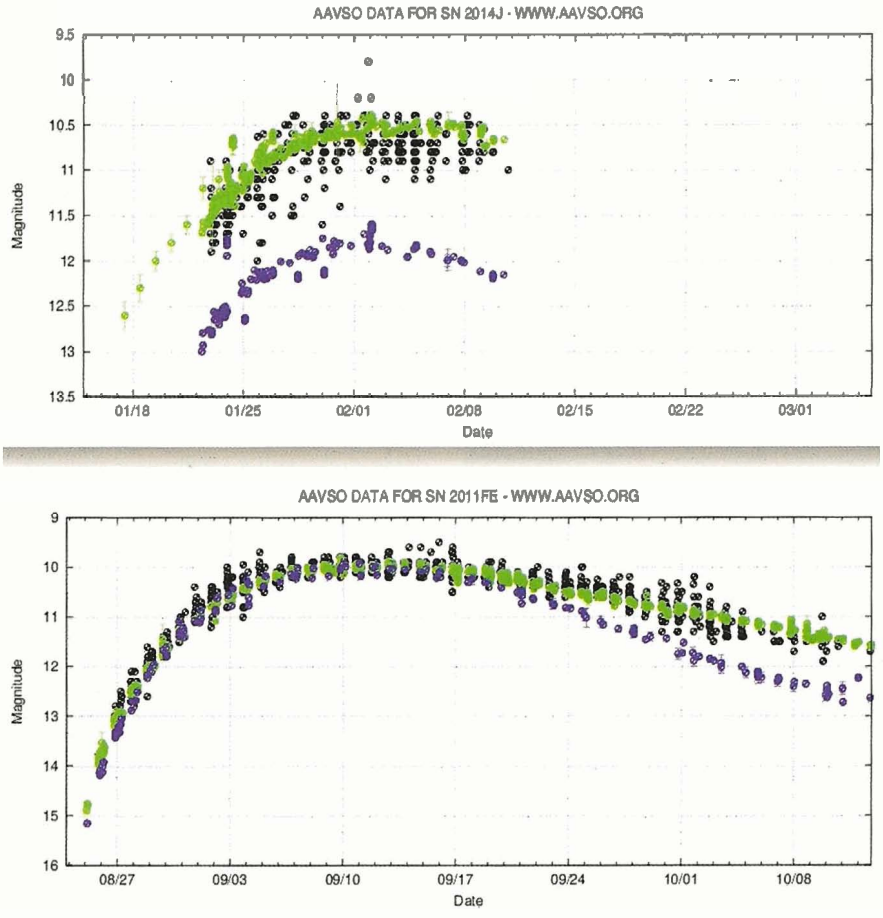
L'enorme quantità di energia liberata in questo processo disintegra letteralmente la nana bianca, scagliando i suoi resti e i nuovi elementi prodotti durante l'ultimo atto della sua esistenza con velocità di migliaia di chilometri al secondo. Nei primissimi giorni dopo l'esplosione, la salita di luminosità della supernova è data dall'energia rilasciata nel processo di decadimento radioattivo del nickel-56 che si trasforma nel più stabile cobalto-56.

Ma anche questo elemento non è poi così tranquillo e, nel giro di qualche mese, decade e si trasforma – alimentando ancora l'emissione energetica della supernova - in ferro-56, questo sì, stabile. Ecco, in estrema sintesi, la storia di una supernova di tipo Ia. Tutto bello, tutto chiaro. Peccato però che non era mai stata osservata alcuna evidenza diretta di questi processi di trasformazione degli elementi che "certificasse" una volta per tutte la validità di questo modello di produzione del ferro, per noi così ragionevole ed elegante.

Gli astronomi erano da tanti anni a caccia, tra i segnali di alta energia provenienti da una supernova, delle tracce di raggi gamma emessi dal cobalto-56 nel suo decadimento a ferro-56 nelle settimane immediatamente seguenti all'esplosione. Si tratta di una "riga spettrale", con una energia ben distinta e nota, inconfondibile.

Inizialmente, gran parte di questi raggi gamma sono assorbiti dal materiale in rapida espansione che altri non è se non i resti della nana bianca esplosa. Col passare del tempo però, questo materiale diviene sempre più tenue e trasparente, e quindi sempre più raggi gamma riescono ad emergere da questa bolla portando con sé tutta la loro energia iniziale. Così se questi fotoni viaggiatori e messaggeri si fossero trovati a incontrare uno strumento in grado di decifrare le informazioni codificate nel loro segnale, avrebbero potuto confermare il processo di decadimento da cobalto a ferro e, quindi, tutta la catena di reazioni termonucleari innescata durante l'accensione di una supernova di tipo Ia.

L'attesa si è conclusa proprio con l'apparizione della SN 2014J, il 21 gennaio del 2014. Le prime indagini sulla sua curva di luce e sul suo spettro hanno fatto saltare sulla sedia i "supernovisti", e per due ottime ragioni. La prima: si trattava proprio di una esplosione con abbastanza energia da creare il ferro. La seconda: SN2014J era piuttosto prossima a noi, tanto da meri-



Confronto fra le curve di luce delle due supernovae di tipo Ia più vicine a noi osservate recentemente: (in alto) la SN 2014j in M82 e (in basso) la quasi altrettanto celebre SN 2011fe esplosa il 24 agosto 2011 nella galassia "girandola" M101. Notare che la magnitudine nel blu (a 4000 Angstrom) della SN 2014j è di quasi 1,5 magnitudini più debole di quella nel visuale (nel verde, a 5000 Angstrom). Ciò a causa dell'oscuramento provocato dalla polvere presente in M82; polvere quasi del tutto assente in M101 (*American Association of Variable Star Observers*).

tarsi la palma di più vicina supernova di tipo Ia esplosa negli ultimi quarant'anni. Insomma, la supernova in M82 diventava di colpo il candidato ideale per cercare la prova della creazione degli elementi che il Sole non sa fare.

Era la grande chance dell'astronomia gamma, con il telescopio INTEGRAL, messo in orbita dall'Europa più di dieci anni fa proprio per carpire i segreti del processo di formazione degli elementi. Il suo rivelatore centrale, in parte costruito in Italia, analizza i raggi gamma. Quelli che vengono da una supernova dovrebbero avere la firma inequivocabile, e ben distinta, di ciascuno degli elementi appena nati, se ci sono davvero. Come abbiamo visto, in questo caso per di più la supernova era abbastanza "vicina", solo a una decina di milioni di anni luce, alla portata del telescopio.

Il *team* di ricercatori guidato da Eugene Churazov, dell'Istituto di Ricerche Spaziali di Mosca, ha così osservato con INTEGRAL e i suoi strumenti la supernova per quattro mesi, dalla fine di gennaio di questo anno alla fine di aprile e poi per tutto il mese di giugno. Un periodo molto lungo, dettato dalla necessità di cogliere il momento migliore per rivelare l'emissione gamma, il momento nel quale i fotoni ce la fanno ad uscire.

Nel periodo immediatamente successivo all'esplosione, la sfera di gas che si espande è ancora densa e i fotoni gamma prodotti dal decadimento non riescono a uscire per cominciare il viaggio che li porterà fino a noi. Bisogna lasciare passare un po' di tempo per dare modo all'espansione di diluire la materia per permettere il passaggio della radiazione gamma. D'altro canto, non si può aspettare troppo, perché ogni 77 giorni la quantità di cobalto pronto a decadere, emettendo le righe che vogliamo osservare, si dimezza, rendendo sempre più debole l'emissione.

Alla fine, è stato scelto l'intervallo di tempo compreso tra 50 e 100 giorni dopo l'esplosione. Un confronto tra i dati raccolti da IBIS (*Imager on Board the Integral Satellite*, uno degli strumenti a bordo dell'osservatorio spaziale) nei 50 giorni del 2014 e quelli di un analogo periodo nel 2013, quando di supernovae vicine non ce n'erano, mostra che quest'anno è presente una sorgente proprio in corrispondenza della posizione di M82. Combinando i dati IBIS con quelli dello spettrometro SPI (*Spectrometer on INTEGRAL*) si è ottenuto uno spettro che mostra chiaramente le righe prodotte dai raggi gamma emessi nel processo di decadimento del cobalto-56. L'analisi accurata dell'energia dei fotoni contenuti in queste righe ha rivelato che sono stati prodotti da materiale in movimento. Addirittura, ha permesso ai ricercatori di dare una stima della velocità del materiale stesso: circa 10.000 km/s, ovvero 36 milioni di km/h. A questa velocità si potrebbe andare dalla Terra al Sole in poco più di quattro ore.

In vista di una pubblicazione sulla prestigiosa rivista *Nature*, i dati di INTEGRAL sono stati spremuti fino all'ultimo bit e gli scienziati sono riusciti a risalire alla quantità di nichel responsabile dell'emissione. Le stime indicano un intervallo di massa compreso tra 0,4 e 0,6 masse solari, cioè un valore perfettamente compatibile con quello che ci si aspetta dall'esplosione di una nana bianca.

Insomma, grande emozione: per la prima volta nella storia della astronomia, cioè nella storia dell'uomo, assistiamo in diretta alla creazione dell'elemento che fa rosso il nostro sangue e con il quale siamo così familiari. E il cerchio della natura si chiude: se è il ferro che porta l'ossigeno al mio cervello, è solo grazie a lui che posso capire come è nato. ■