

## Le stelle

### Vita di una stella

#### Evoluzione stellare

Le stelle nascono, vivono e muoiono come gli essere viventi; solo che lo fanno su scale di tempo così lunghe da sembrarci eterne e immutabili. Così, volendone studiare il ciclo vitale non resta che ipotizzare un'evoluzione simile per tutte le stelle e prendere un vasto campione di oggetti a diversi stadi. Un po' come osservare un neonato, un adulto e una persona anziana per studiare il ciclo dell'uomo.

Perché le stelle evolvono? Per tutta la sua vita una stella deve fare i conti con lo scontro titanico tra le due forze principali che la governano. Se si modificano alcune condizioni e una riesce a prevalere sull'altra l'equilibrio si rompe, generando reazioni a catena che modificano la struttura stellare e che portano a una nuova condizione di equilibrio. In questo modo, l'evoluzione di un astro è costellato da lunghe fasi di stabilità alternate a brevi intervalli di instabilità in cui avvengono i principali cambiamenti evolutivi. Il fattore chiave da cui dipende lo sviluppo di una stella è la sua massa. Maggiore è la quantità di materia, maggiore è la pressione necessaria a contrastare il collasso e quindi maggiore è la quantità di combustibile bruciato. Di conseguenza le stelle più grandi sono più luminose di quelle di piccola massa, ma vivono anche molto meno.

#### Nascita e maturità

Da dove nascono le stelle? Lo spazio interstellare non è vuoto, ma è riempito dal cosiddetto mezzo interstellare, una miscela di gas e polveri distribuiti su larga scala in maniera pressoché uniforme. Andando però a osservare su scala ridotta notiamo che la materia tende ad addensarsi e formare nubi di gas, prevalentemente idrogeno, e polveri. Queste nubi sono in equilibrio dinamico e termico alla rigida temperatura di  $-270^{\circ}\text{C}$ . Per cause esterne alle nubi stesse, a volte può succedere che il materiale di cui sono composte cominci a comprimersi in un volume minore e a risentire dell'effetto della mutua attrazione gravitazionale. Via via che si contrae la compressione riscalda il gas soprattutto nelle regioni più interne della nube e l'oggetto in formazione comincia a splendere. Ma è solo quando la temperatura centrale raggiunge i 10 milioni di gradi e si innescano le prime reazioni nucleari che una stella nasce a tutti gli effetti. Infatti, il calore generato dalla fusione dell'idrogeno fa espandere il gas che riesce, a sua volta, a controbilanciare efficacemente il collasso gravitazionale su tempi scala assai lunghi. La nuova stella si trova così nella condizione di equilibrio più stabile e duratura della sua intera esistenza, rimanendo approssimativamente costante in dimensioni e luminosità. Il nostro Sole si trova circa a metà di questa fase; per stelle di massa paragonabile questo periodo dura circa 10 miliardi di anni. Abbiamo già detto che il Sole è una stella di tipo medio. La maggioranza delle stelle presenti nella Via Lattea sono più piccole della nostra e sono chiamate nane rosse; con una massa pari a un terzo di quella della nostra stella bruciano il loro combustibile a un ritmo molto lento e possono rimanere a questo stadio evolutivo anche per centinaia di miliardi di anni, un tempo più lungo di quello dell'intero universo.

Sotto le 0,08 masse solari ci sono invece le nane brune, corpi che non possono essere considerate stelle a tutti gli effetti perché il collasso gravitazionale non riesce ad accendere le reazioni nucleari centrali.

Alcune stelle, al contrario, sono anche più grandi del Sole. Con una massa compresa tra le 10 e le 50 masse solari e dimensioni di 1000 volte superiori, abbiamo le cosiddette supergiganti. Oggetti di questo tipo consumano il carburante a ritmi molto elevati e, di conseguenza, hanno una vita breve, qualche centinaio di milione di anni, costellata da frequenti fasi di instabilità in cui possono anche subire elevate perdita di massa. Le stelle supergiganti sono generalmente blu, ma nel corso della loro evoluzione cambiano colore fino a diventare rosse.

#### Vecchiaia

Cosa succede quando il carburante principale si sta esaurendo? La stella ha bruciato quasi tutto l'idrogeno disponibile per la fusione nucleare, che rappresenta circa un 10% del totale e il nucleo è composto quasi esclusivamente da elio

inerte. La produzione di energia che prima bilanciava il collasso gravitazionale è ora insufficiente a contrastarlo e si rompe l'equilibrio. Anche se in un primo momento all'esterno della stella non si nota niente, il nucleo stellare comincia a contrarsi a causa della sua stessa massa, aumentando progressivamente densità e temperatura. Come prima conseguenza, le reazioni di fusione si propagano fuori dal nucleo ormai spento e coinvolgono un guscio sottile di idrogeno circostante. Lo spostamento verso l'esterno delle reazioni di fusione crea un aumento di pressione del gas delle regioni superficiali. Il risultato è che mentre il nucleo della stella si contrae, le zone esterne si espandono, raffreddandosi perché la stessa quantità di calore ora si disperde su una superficie maggiore. Abbiamo già detto che la temperatura superficiale di una stella è correlata al suo colore e che più una stella è fredda più il suo colore tende al rosso. Ecco quindi che mentre si gonfia l'astro si arrossa, entrando nella fase evolutiva nota con il nome di gigante rossa. Le giganti rosse possono avere diametri dalle 50 alle 2000 volte più grandi di quello del Sole e possono essere anche 3 volte più fredde della nostra stella.

## Morte

E dopo? Tutto dipende dalla massa della stella.

Astri di massa inferiore a quella solare diventano instabili. Non riuscendo più a gestire l'intera massa, la stella espelle in uno sbuffo di gas gli strati superficiali, dando vita a una nebulosa planetaria. Si può dire che non esiste una nebulosa planetaria uguale all'altra: il gas espulso si colora di tante sfumature e prende le forme più varie, dando vita a uno degli spettacoli più affascinanti del cielo. Al centro della nebulosa rimane il cuore pulsante della vecchia stella non più grande della Terra, ma caldissima: una nana bianca. In questo tipo di stella la fusione nucleare non è più attiva; la gravità trova la sua rivale non più nella pressione di espansione del gas ad alta temperatura, ma nella pressione generata dal gas che si trova compresso in un volume molto piccolo. Su una nana bianca un cucchiaino di materia arriva a pesare quanto un'automobile! In questo stato l'oggetto perde lentamente l'energia residua, raffreddandosi e progressivamente spegnendosi fino a diventare opaco e scuro, corpo senza vita nei freddi spazi interstellari.

In stelle di massa paragonabile a quella solare il collasso del nucleo si arresta solo quando la temperatura centrale supera i 100 milioni di gradi, valore di soglia che permette la riaccensione delle fusioni nucleari. Questa volta sono gli atomi di elio che si fondono in atomi di carbonio e che, rilasciando energia, ripristinano l'equilibrio perduto; mentre però con la fusione dell'idrogeno la stabilità può durare decine di miliardi di anni, quella dell'elio è meno longeva e mantiene l'equilibrio per meno di un miliardo di anni. Quando si esaurisce anche l'elio, si rompe nuovamente l'equilibrio e la gravità riprende il sopravvento. Il destino del Sole è comune a quello delle nane rosse: a parte il guizzo dell'elio, alla fase di gigante rossa segue quello di nana bianca circondata da una nebulosa planetaria.

Ben diversa invece è la sorte che tocca le stelle con una massa superiore alle 3-4 masse solari. In questi astri la rottura dell'equilibrio si ripropone diverse volte a ritmo sempre più sostenuto. Ogni volta che si esaurisce il carburante per la reazione nucleare si ripete il processo appena descritto con l'innescarsi di cicli di fusioni di elementi via via più pesanti e che mantengono l'equilibrio per tempi sempre più ridotti. Quando la stella si ritrova con un nucleo di ferro, le reazioni di fusione nucleare si arrestano definitivamente. Non incontrando più alcuna resistenza la gravità fa collassare improvvisamente il nucleo che rilascia l'energia immagazzinata: la stella esplosa e diventa una supernova, talmente luminosa da offuscare per un paio di mesi persino la galassia che la ospita. L'esplosione però non distrugge completamente la stella; ne rimane il nucleo, la cui sorte dipende ancora una volta dalla sua massa. Per nuclei fino a 2-3 masse solari si crea una stella di neutroni, un oggetto esclusivamente composto da particelle atomiche di questo tipo. Qui il collasso gravitazionale è ancora una volta arrestato dalla pressione generata dall'elevata densità della materia. Così su una stella di neutroni un cucchiaino di materia può pesare anche 100 milioni di automobili. E' come se tutta la massa del Sole venisse compressa in una sfera di circa 10 km di raggio, poco più grande di una città di medie dimensioni.

A volte può accadere che le stelle di neutroni ruotino rapidamente intorno al proprio asse. In questo caso l'oggetto prende il nome di pulsar, perché la sua luce viene incanalata nella direzione del suo campo magnetico, 1000 miliardi di volte più potente di quello terrestre. Il fenomeno produce una pulsazione luminosa, come l'effetto del fascio luminoso di un faro, che vediamo solo quando intercetta la nostra linea di vista. Recentemente è stata misurata la pulsar più rapida

mai osservata, che ruota alla strabiliante frequenza di circa 1100 giri al secondo!

Se la stella è ancora più massiccia, si assiste al trionfo assoluto della gravità; il collasso genera, infatti, i famigerati buchi neri, oggetti così densi e compatti che neppure la luce riesce a sfuggire dalla loro superficie. Poiché in astronomia l'unica fonte di informazione è quella che ci trasporta la luce, i buchi neri sono stati per decenni frutto solo di calcoli teorici. La loro esistenza è stata dimostrata solo negli ultimi 50 anni e solo indirettamente per gli effetti gravitazionali che producono nelle loro immediate vicinanze.

## Gli oggetti compatti

Nel paragrafo sull'evoluzione stellare abbiamo detto che sia nelle nane bianche sia nelle stelle di neutroni il collasso gravitazionale è arrestato da una pressione che non dipende più dalla temperatura a cui si trova il gas, ma dalla sua densità. In astrofisica corpi di questo tipo sono chiamati oggetti compatti e la materia di cui sono composti prende il nome di materia degenere. Per spiegarne il comportamento dobbiamo passare dalla sfera dell'estremamente grande a quella dell'infinitamente piccolo: è la moderna meccanica quantistica che ci viene in soccorso. Non bisogna però stupirsi del salto da una disciplina scientifica all'altra. I diversi rami della scienza si supportano vicendevolmente e sempre più spesso le loro scoperte si sovrappongono a formare un quadro unico più completo. Ora, la meccanica quantistica dice che le particelle atomiche, come i protoni, i neutroni e gli elettroni, hanno una serie di proprietà che li caratterizza: la massa, la carica elettrica e alcuni numeri, chiamati numeri quantici, che ne descrivono l'energia. Particelle di questo tipo obbediscono a una legge chiamata **principio di esclusione di Pauli**, dal nome del fisico austriaco che la scoprì: due particelle energeticamente identiche non possono coesistere in un volume di spazio molto piccolo. In una nana bianca, la materia è ionizzata e gli elettroni sono svincolati dalle loro orbite atomiche intorno ai nuclei. Durante il collasso gravitazionale, aumenta la densità della materia e quindi la concentrazione di elettroni entro un certo volume di spazio. La compressione continua finché gli elettroni riescono ad assumere configurazioni energetiche che li differenziano. Esaurite tutte le possibili combinazioni, per il principio di esclusione di Pauli in quel dato volume non possono più entrare altri elettroni; si crea una specie di barriera che impedisce alla materia di collassare ulteriormente. La nana bianca raggiunge quindi la sua configurazione stabile finale. Lo stesso meccanismo avviene anche nelle stelle di neutroni; durante il collasso finale l'elevata massa della stella produce densità per cui elettroni e protoni atomici si fondono insieme e formano neutroni. La stella si ritrova così composta da un ammasso compatto di particelle pesanti ed elettricamente neutre che sta implodendo sotto l'effetto della gravità. Ancora una volta vengono in soccorso le proprietà quantistiche di queste particelle che, come gli elettroni, obbediscono al principio di esclusione di Pauli. Oltrepassata, quindi, una certa soglia, la densità dei neutroni arresta il collasso gravitazionale, stabilizzando definitivamente la stella.

## Reazioni nucleari

Le reazioni che coinvolgono il nucleo dell'atomo sono due: la fusione e la fissione. La prima parte da elementi semplici per costruirne di più complessi; la seconda agisce in senso contrario spaccando nuclei di elementi pesanti in nuclei di elementi più leggeri. In entrambi i casi si ha un'elevata produzione di energia. Prendiamo per esempio la fusione: la massa dei nuclei atomici che si fondono è maggiore di quella del nuovo nucleo che si forma. Poiché sappiamo che massa ed energia si equivalgono dalla nota formula di Einstein  $E = mc^2$ , la differenza di massa è proprio quella che si trasforma in energia emessa. In modo analogo, anche nella fissione l'energia prodotta si origina dalla differenza tra la massa del nucleo iniziale e quella dei due nuclei risultanti: in questo caso la prima è maggiore della somma delle seconde. Per produrre energia non tutti gli elementi però si possono fondere così come non tutti si possono spaccare. In natura, infatti, i fenomeni tendono spontaneamente verso stati di "fatica" minima. Quindi se ci vuole maggiore energia per spaccare un nucleo di quanto ne serva per tenerlo unito, la fissione di fatto non avviene. È il caso degli elementi più leggeri; fondendosi e aumentando il numero di particelle, il nucleo diventa più stabile e l'energia in eccesso viene liberata. Viceversa quando il nucleo di un elemento diventa troppo grosso, diventa energeticamente faticoso tenerlo unito. Basta quindi poco per scinderlo in due nuclei più leggeri e stabili liberando, ancora una volta, il surplus di energia. Quando la fissione diventa energeticamente preferibile alla fusione? Il limite è il ferro; il suo nucleo è troppo grosso per fondersi ulteriormente e riuscire a produrre un altro nucleo stabile. La fusione di due nuclei di ferro richiede perciò

maggior energia di quanto ne produca; da qui in poi la reazione piú vantaggiosa è la fissione nucleare. Non a caso, infatti, durante l'evoluzione di stelle massicce, una volta creato il ferro nel nucleo non sono piú possibili altri cicli di fusione.