

# Vita, morte e resurrezione delle stelle

- Testo adattato da un articolo pubblicato sulla  
Enciclopedia delle Scienze – vol I “L’Universo” – La Biblioteca di Repubblica (2005) -

Franco Pacini

INAF - Osservatorio Astrofisico di Arcetri  
Università degli Studi di Firenze

## Introduzione

Le stelle sono grandi sfere di fuoco formate da gas incandescenti, in grado di splendere grazie al loro calore interno. Esse nascono dalla condensazione di gas sparsi nei vasti spazi interstellari sotto l'azione della forza di gravità. La loro esistenza prolungata (milioni o miliardi di anni) è assicurata dal fatto che i gas stellari tendono a sfuggire nello spazio. Questo è contrastato dalla gravità che tende a condensarli. In una stella queste due forze sono in preciso equilibrio. Se non lo fossero, per esempio nel caso del Sole, esso si distruggerebbe in meno di un'ora. Il nostro sistema solare è formato da un solo astro centrale, il Sole. Nella maggioranza dei casi vi sono due o più stelle ravvicinate, anch'esse legate fra loro dalla forza di gravità. Gli ipotetici abitanti di un pianeta orbitante intorno a un sistema del genere vedrebbero due Soli, magari di dimensioni e colore diversi. Essi sorgerebbero e tramonterebbero in momenti differenti, occupando zone diverse del cielo e ciascuno produrrebbe una propria ombra sulla superficie del pianeta stesso.

Come nascono, vivono e muoiono le stelle? Rispondere a questa domanda non è facile, anche perché il cielo sembra immutabile, anno dopo anno. Fatti salvi i cambiamenti stagionali, le stelle ci appaiono sempre uguali, mantengono lo stesso colore, l'identica luminosità, le stesse posizioni relative. Anche il Sole non è mutato negli ultimi miliardi di anni. Se così non fosse e, per esempio, la luminosità fosse variata, le conseguenze sulla Terra sarebbero state enormi.

Dati i tempi lunghissimi, la comprensione della evoluzione delle stelle non può passare attraverso l'osservazione dei singoli astri, come accade quando vediamo come nasce e muore un fiore o un animale. Immaginate un insetto che viva solo poche ore. Guardando gli uomini, potrebbe egli capire come i bambini nascono, diventano adulti e poi vecchi? Che esistono razze diverse ma fundamentalmente uguali? Si tratta di cercare ordine in un insieme di dati a prima vista non collegabili. Per esempio le stelle hanno colori diversi. Questo indica temperature superficiali diverse, un po' come accade a un pezzo di ferro riscaldato nella fucina di un fabbro: dapprima esso si riscalda ed emette luce infrarossa (al buio sarebbe invisibile); poi diventa rossiccio; poi giallo; infine, bianco incandescente. Anche per le stelle, colori diversi corrispondono a temperature superficiali diverse. Gli astronomi sanno come misurare la massa degli astri e hanno scoperto che il Sole è una stella media. Esistono quelli che contengono un centesimo della materia contenuta nel Sole così come ne esistono altri che sono decine (fino a un centinaio) di volte più massicci. Anche le dimensioni sono notevolmente diverse. Il Sole ha un diametro circa 100 volte quello della Terra (quindi potrebbe contenere nel suo volume un milione di Terre), mentre alcune stelle (chiamate nane bianche) sono grandi come il nostro pianeta. Altre, gigantesche, potrebbero invece contenere milioni di Soli. La comprensione della evoluzione cosmica è stata una delle grandi conquiste intellettuali del XX secolo e, come vedremo, si è realizzata in uno stretto rapporto fra astronomia e fisica.

## Perché splendono le stelle?

Cosa è la caldaia che tiene acceso il Sole e le altre stelle? Sappiamo che al centro del Sole e delle stelle avvengono processi simili a quelli di una bomba nucleare. Essi però si svolgono in modo non esplosivo. Dobbiamo ricordare che tutta la materia intorno a noi è composta di atomi e che gli atomi sono fatti come un piccolo sistema solare: un nucleo centrale circondato da particelle elettrizzate, gli elettroni. A ogni atomo corrisponde un elemento chimico. Nel caso

dell'atomo più semplice, quello dell'elemento idrogeno, c'è un nucleo composto da una particella chiamata protone con intorno un solo elettrone. L'atomo subito più complesso corrisponde all'elemento "elio", con due elettroni intorno a un nucleo formato da due protoni e altrettanti neutroni. L'ossigeno invece ha otto elettroni che circondano un nucleo di 8 protoni e altrettanti neutroni. E così via per tutti gli altri elementi. Quando noi bruciamo nel caminetto un pezzo di legna lo trasformiamo inizialmente in carbone. Il carbone a sua volta può bruciare lasciando delle ceneri. In questo caso gli atomi che compongono la legna (carbonio) si combinano con gli atomi di ossigeno nell'aria e si ha un rimescolamento degli elettroni orbitanti che libera energia. La legna che brucia produce luce e calore senza che i nuclei atomici siano modificati. Se però si raggiungono temperature altissime quali quelle presenti al centro di una stella, anche i nuclei possono fondersi fra loro liberando energia nucleare. Perché ciò accada è necessario che i nuclei atomici arrivino a collidere fra loro ad alta velocità, vincendo la repulsione elettrica: questo è possibile solo se i gas sono abbastanza caldi, almeno una decina di milioni di gradi (la temperatura centrale del Sole). Nel Sole l'elemento più abbondante è l'idrogeno. Nelle parti centrali del Sole, i nuclei di idrogeno si fondono continuamente fra loro e producono elio. In questo modo il calore viene continuamente rigenerato. Questo è cominciato quando il Sole si è formato, oltre 4 miliardi di anni fa e continuerà all'incirca per altrettanto tempo, prima che l'idrogeno si esaurisca.

### **Come morirà il Sole?**

Ci si può quindi chiedere cosa succederà al Sole fra 4 o 5 miliardi di anni, quando esso avrà esaurito l'idrogeno e dovrà trovare un nuovo equilibrio. Calcoli basati sulle leggi della fisica mostrano che il Sole subirà allora un raffreddamento e si porterà a una temperatura più bassa di quella attuale (in superficie circa 3700 gradi invece che 6000). Esso diventerà rosso invece che rimanere giallo e si gonfierà fino ad essere centinaia di volte più grande rispetto alle dimensioni attuali. A un certo punto, la Terra verrà riassorbita dal Sole. Quanto previsto per l'avvenire del Sole e di stelle simili trova riscontro nelle osservazioni. Esistono infatti in cielo molte stelle, rosse e grandissime, che si trovano in questa fase della loro vita. Per esempio, Betelgeuse, nella costellazione di Orione, potrebbe contenere al suo interno più di un milione di soli. La dimensione diventa così grande da permettere il distacco delle parti esterne, che vengono soffiate via. Il gas espulso si presenta al telescopio come una nuvola in espansione. Gli astronomi hanno individuato molte di queste nuvolette e le hanno denominate "nebulose planetarie" perché, con un piccolo telescopio, esse sembrano dischi simili ai pianeti. Il loro destino è dissolversi lentamente nello spazio, restituendo parte del gas di cui era composta la stella originaria. Della stella resta solo un nocciolo centrale che inizialmente è molto caldo, emette luce bianca incandescente ed ha più o meno le dimensioni della Terra. Esso è estremamente denso, circa una tonnellata per centimetro cubico. Proprio per le dimensioni ridotte e il colore, astri di questo genere vengono chiamati "nane bianche". Il nucleo del Sole è destinato a diventare una nana bianca. Le nane bianche non hanno più combustibile da bruciare e si raffreddano lentamente, diventando sempre più scure, fino ad essere praticamente invisibili (nane nere).

La scoperta delle nane bianche risale alla seconda metà dell'ottocento, quando la prima di esse fu trovata in orbita intorno alla stella Sirio. La scoperta di questo astro fu per lungo tempo un mistero perché era impossibile, sulla base della fisica classica, spiegarne l'equilibrio. Solo molti anni dopo (intorno al 1930) gli sviluppi della meccanica quantistica, e in particolare gli studi di Enrico Fermi relativi al comportamento di gas molto densi, portarono l'astrofisico indiano Chandrasekar a una spiegazione. La pressione di un gas molto denso non dipende più dalla temperatura ma soprattutto dalla densità. La teoria di Chandrasekar prevede che le nane bianche debbano avere una massa non superiore a 1.5 volte quella del Sole anche se oggi sappiamo che le stelle da cui esse derivano possono essere notevolmente più massicce, fino a circa 8-10 masse solari (è noto che, durante la loro vita, le stelle possono perdere gran parte della massa). Da quando la nostra Galassia è nata, l'evoluzione delle stelle simili al Sole (che sono la maggioranza) ha prodotto circa 10 miliardi di nane bianche, in gran parte ormai trasformate in oscuri cadaveri stellari sparsi nello spazio. Per questa spiegazione Chandrasekar ricevette tanti anni dopo (nel 1983) il premio Nobel per la fisica.

## **Come muoiono le stelle massicce?**

Chiarito il problema delle nane bianche, bisogna capire quale possa essere il destino delle stelle molto più massicce del Sole. Si potrebbe pensare che - avendo più combustibile - possano vivere più a lungo. Esse sono però estremamente brillanti, fino a centinaia di migliaia di volte più del Sole. In questo modo l'energia si consuma in fretta e la loro vita dura solamente dieci o cento milioni di anni.

Dopo aver convertito l'idrogeno in elio e l'elio in carbonio, queste stelle sono in grado di formare gli altri elementi chimici attraverso reazioni nucleari che coinvolgono elementi sempre più pesanti. In questo modo si formano ossigeno, sodio, neon e così via, fino al ferro.

Una delle conseguenze più importanti della evoluzione stellare è che noi, esseri viventi sulla Terra, dobbiamo la nostra esistenza ad astri che hanno brillato miliardi di anni fa. Se non ci fossero state quelle stelle, la nostra Galassia sarebbe stata composta quasi completamente di idrogeno, di un po' di elio e di tracce di deuterio, gli elementi primordiali dell'Universo. Gli esseri viventi invece contengono anche il carbonio, l'ossigeno, il ferro e tanti altri elementi che non esistevano agli inizi e che sono stati fabbricati con le reazioni nucleari al centro delle stelle. Quando queste stelle sono morte e si sono dissolte, gli elementi si sono sparsi nella Galassia e sono stati coinvolti nella formazione di nuove generazioni di stelle, pianeti e gran parte delle sostanze di cui noi stessi siamo composti.

La fisica nucleare ci insegna che le reazioni successive al bruciamento dell'idrogeno sono in genere sempre meno energetiche e che, arrivati al ferro, non si può estrarre energia nucleare. La formazione di elementi oltre il ferro richiede la fornitura di energia. A questo punto viene meno per le stelle la possibilità di compensare, con processi nucleari, il calore perso verso l'esterno. Si ha allora il crollo - dovuto alla forza di gravità - delle parti centrali dell'astro.

Se la massa delle parti centrali supera il limite di circa 1.5 masse solari, il collasso non può fermarsi allo stadio di nana bianca ma il nucleo stellare deve continuare a contrarsi. La materia diviene così compatta da rendere inevitabile la fusione dei protoni con gli elettroni. Si genera allora un astro formato soprattutto da neutroni, con una densità pari a circa 1 miliardo di tonnellate per centimetro cubico e raggio di circa 10 chilometri.

Anche le stelle di neutroni sono soggette a un limite per la loro massa, non molto diverso da quello delle nane bianche, compreso fra due e tre masse solari. Sulla superficie di una stella di neutroni la gravità è fortissima. Come noto, un corpo lanciato nello spazio deve avere una velocità di almeno 11 chilometri al secondo per lasciare definitivamente la Terra. La velocità di fuga dalle stelle di neutroni è addirittura un terzo di quella della luce, circa 100.000 chilometri al secondo. Se poi la massa supera il valore limite, l'astro subisce un collasso indefinito, fino al punto in cui la gravità diventa così forte da impedire persino alla luce di sfuggire. Si forma così uno dei cosiddetti Buchi Neri, anche essi ipotizzati negli anni 1930. Sappiamo oggi che le stelle con massa da 8 fino a circa 30 volte la massa del Sole diventano, alla fine della loro vita, stelle di neutroni; quelle ancor più massicce diventano invece dei buchi neri. Ci si può attendere, sulla base di quanto sappiamo sull'evoluzione delle stelle nella nostra galassia, che essa contenga circa un miliardo di stelle di neutroni e milioni di buchi neri.

## **A caccia di stelle di neutroni e buchi neri**

L'idea che stelle di neutroni e buchi neri potessero esistere rimase una speculazione per oltre 30 anni. Non sembrava infatti possibile rivelare la presenza nella galassia di oggetti grandi pochi chilometri attraverso le normali osservazioni astronomiche. Fu solo negli anni '60 che si cominciò a riflettere seriamente sul fatto che le stelle di neutroni, se esistenti, avrebbero potuto dare indicazioni indirette della loro presenza. Ci si poteva infatti attendere che esse fossero fortemente magnetizzate (migliaia di miliardi di volte più del Sole) e che ruotassero molto velocemente su se stesse (fino a 1000 volte circa al secondo). Le leggi della fisica fanno

prevedere infatti, sulla base di principi generali, che questo succeda ogni qualvolta una stella si contrae. Al tempo stesso, molto rapidamente (più o meno in un secondo), viene liberata una grande quantità di energia gravitazionale. La formazione di un nucleo centrale molto compatto è accompagnata dalla esplosione delle regioni esterne: la stella esplose come Supernova e i gas che la compongono vengono espulsi con una velocità fino ed oltre 10.000 chilometri al secondo. Già negli anni '30, due astrofisici americani Baade e Zwicky, avevano avanzato l'idea che l'esplosione delle Supernovae fosse dovuta proprio all'improvvisa liberazione di energia a causa del collasso delle parti più interne di stelle massicce.

Possono rotazione e campi magnetici dar luogo a fenomeni osservabili? Dove cercare questi fenomeni? Ovviamente essi vanno cercati dove si sa che sono esplose delle stelle, nei cosiddetti "resti di Supernova". L'esempio tipico è la Nebulosa del Granchio.

Questo oggetto celeste si trova alla distanza di circa 6000 anni luce ed è il residuo di una Supernova osservata nella costellazione del Toro nel 1054 D.C. I gas derivanti dalla distruzione dell'astro si sono nel frattempo espansi per circa 1000 anni, alla velocità di circa mille chilometri al secondo. Essi occupano attualmente un volume con raggio di circa 3 anni luce. La Nebulosa del Granchio emette radiazioni di tutti i tipi, radio, ottico, infrarosso, X e gamma, con una luminosità totale pari a circa 100.000 volte quella del Sole. Solo una piccola parte di queste radiazioni è dovuta ai gas. Il resto è dovuto alla presenza, nel volume nebulare, di elettroni in moto quasi alla velocità della luce, prodotti continuamente all'interno della Nebulosa stessa. Questi elettroni vengono deviati nel loro moto dal campo magnetico esistente nella Nebulosa e, secondo le leggi della fisica, emettono una radiazione detta "radiazione di sincrotrone". Per molti anni l'origine di questi elettroni fu un mistero. Da dove venivano? Quale processo poteva accelerarli fino a energie ben superiori a quelle raggiungibili nei moderni laboratori come il Centro Europeo di Ricerche Nucleari (CERN) di Ginevra?.

### **La prima resurrezione: le pulsars**

Le pulsars furono scoperte nel 1967 da un gruppo di astronomi inglesi guidati da Anthony Hewish, che includeva una giovane studentessa, Jocelyn Bell. Fu quest'ultima ad accorgersi che dal cielo arrivavano onde radio di tipo mai visto precedentemente. In poche parole, gli astri normali brillano con continuità, anche se a volte con un'intensità variabile. Le osservazioni di Jocelyn Bell mostravano invece l'esistenza di sorgenti di onde radio in grado di emettere segnali periodici, accendendosi e spegnendosi rapidamente (circa una volta al secondo) e con una grande regolarità, precisa fino a molte cifre decimali. Occorsero alcuni mesi perché tutto il gruppo si convincesse che era stato scoperto un nuovo tipo di astri che si accendono e spengono regolarmente (Pulsars). Il mondo scientifico fu messo a subbuglio dalla scoperta e gli scienziati si divisero fra coloro che pensavano che potesse trattarsi di un nuovo fenomeno legato alle nane bianche e chi pensava che l'origine delle pulsars potesse essere ricercata fra le stelle di neutroni e legata alla loro rotazione, proprio come accade nei fari. In quest'ultimo caso, il posto dove trovare una pulsar era ovviamente il luogo dove era certamente esplosa una supernova, la Nebulosa del Granchio. Essa fu trovata davvero circa un anno dopo la prima scoperta e si capì che le pulsars erano veramente delle stelle di neutroni ruotanti, come avevano suggerito l'astrofisico americano Thomas Gold e l'autore del presente articolo, entrambi allora negli Stati Uniti, presso la Cornell University. E' probabile che il "faro" tragga origine dal fatto che la radiazione è emessa dai poli stellari e che noi vediamo questi poli in modo intermittente a causa della rotazione. Non solo, ma si scoprì che la pulsar nella Nebulosa del Granchio rallentava progressivamente la sua rotazione, seppur in misura piccolissima. Questo rallentamento corrisponde esattamente alla perdita di energia necessaria per la produzione di elettroni ultraveloci nella Nebulosa. In altre parole, è proprio la stella di neutroni la sorgente delle particelle osservate! Il meccanismo che produce questo risultato è ancora oggi poco compreso.

Quando le stelle di neutroni ruotano, il campo magnetico tende a frenarle e si ha la produzione di particelle velocissime. La morte di una stella massiccia non è quindi l'ultimo atto nella sua vita. Al contrario, questa vita continua in una forma diversa e si manifesta nel fenomeno pulsar,

una vera e propria resurrezione. La scoperta delle pulsars è stata di tale importanza da far meritare a Anthony Hewish il premio Nobel per la Fisica nel 1974.

### **La seconda e terza resurrezione: sorgenti compatte di raggi X e pulsars ultraveloci**

Si è già detto che, man mano che il tempo passa, le stelle di neutroni rallentano la loro rotazione. Dopo circa 10 milioni di anni esse ruotano in modo relativamente lento, l'energia liberata diventa piccola e si spengono. Nella nostra galassia sono state scoperte alcune migliaia di pulsars ma il numero totale di stelle di neutroni è molto maggiore, circa un miliardo: gran parte di esse sono ormai divenute "cadaveri", avendo esaurito la capacità di ruotare in fretta. C'è però caso in cui esse possono resuscitare, quando la stella di neutroni orbita accanto a una stella normale.

Come abbiamo già detto agli inizi di questo articolo, le "stelle doppie" sono piuttosto frequenti. Accade allora che l'eventuale stella di neutroni possa catturare, tramite la sua fortissima gravità, materia sfuggita all'astro normale. Questa materia cade sulla stella di neutroni e si riscalda fino a raggiungere temperature di decine di milioni di gradi, emettendo raggi X. Le prime scoperte relative all'esistenza di sorgenti cosmiche di raggi X furono fatte da Riccardo Giacconi, Bruno Rossi (due fisici italiani emigrati negli Stati Uniti), Herbert Friedmann e dai loro collaboratori negli anni '60, inviando sopra l'atmosfera razzi e satelliti. Oggi sappiamo con certezza che gran parte delle sorgenti X derivano dalla caduta di materia su stelle di neutroni ma che, in alcuni casi, l'oggetto collassato non è una stella di neutroni bensì un buco nero, completando quindi l'inventario osservativo dei cadaveri di stelle previsti dalla teoria. E' ovvio che, nel caso dei buchi neri, l'emissione dei raggi X avviene mentre i gas cadono verso la stella collassata e che ogni radiazione si spegne una volta che essi sono arrivati al buco nero. In sostanza, la fase "sorgenti di raggi X" rappresenta un'ulteriore resurrezione nella vita di una stella, possibile purché essa appartenga a sistemi binari. Si potrebbe quasi scherzare e dire che, anche nel cielo, la presenza di un compagno giovane può far bene alla vita di coppia e portare a un ringiovanimento! La scoperta delle sorgenti compatte di raggi X ha portato all'attribuzione del premio Nobel nel 2002 a Riccardo Giacconi.

Il fenomeno "sorgenti X" può continuare solo finché dura la cattura di gas sottratti dall'astro collassato alla stella compagna normale. Durante questa fase la caduta di materia è accompagnata da una accelerazione del moto rotatorio dell'astro su cui il materiale cade. Ci si deve quindi attendere che, al termine, l'astro collassato torni a ruotare velocemente. Anche questa previsione è stata confermata osservativamente dalla scoperta in cielo di un notevole numero di pulsars in rotazione ultra rapida, fino a mille volte a secondo e, ancora una volta, si è visto che le stelle sono dure a morire.

### **Ultimo tango fra le stelle**

Non è difficile intuire che, al termine di tutti questi passaggi evolutivi, si possa trovare in cielo qualche sistema formato da due stelle collassate (due stelle di neutroni oppure due buchi neri oppure una stella di neutroni e un buco nero). Essi sono stati effettivamente trovati con implicazioni straordinarie per la ricerca astronomica e la fisica. Tali sistemi, secondo la teoria di Einstein, non possono vivere indefinitamente. Essi perdono energia sotto forma di onde gravitazionali, in qualche modo analoghe alle più familiari onde elettromagnetiche. Come conseguenza, i due astri si avvicinano sempre di più e, dopo decine o centinaia di milioni di anni, cadono l'uno sull'altro in un'ultima violentissima collisione. Già in passato gli astronomi si sono accorti che, in un sistema doppio contenente stelle di neutroni, l'orbita degli astri si sta lentamente modificando e stringendo sempre di più. Le osservazioni fatte hanno dimostrato che tale sistema si comporta come previsto dalla teoria della gravitazione di Einstein e che le onde gravitazionali esistono veramente. L'importanza di questo risultato è tale che ancora una volta, agli autori della misura Hulse e Taylor della Università di Princeton è stato conferito nel 1993 il premio Nobel. Più recentemente, nel 2004, un gruppo di astrofisici italiani di Bologna e Cagliari, con alcuni colleghi stranieri, ha scoperto un sistema ancora più compatto in cui la distanza fra le due stelle è di "soli" 900.000 chilometri (meno di tre volte la distanza Terra-

Luna). Esso permetterà di verificare con estrema precisione la teoria einsteiniana. Nel frattempo sono stati anche costruiti degli strumenti speciali con cui misurare direttamente l'arrivo delle onde gravitazionali. Uno di questi strumenti, VIRGO, sta attualmente cominciando a funzionare a Cascina, vicino a Pisa, frutto di una collaborazione fra l'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN) e il Consiglio Nazionale delle Ricerche francese (CNRS). Uno degli scopi principali di VIRGO è quello di rivelare l'arrivo delle onde gravitazionale risultante dalla collisione finale tra due astri collassati.

L'energia liberata in questo evento, durante una frazione di secondo, è gigantesca e dovrebbe manifestarsi, oltre che come onde gravitazionali, anche sotto forma di un improvviso lampo di raggi gamma. Questi eventi si verificano in ogni galassia all'incirca una volta ogni qualche decina o centinaio di migliaia di anni e sono visibili dalla Terra anche quando accadono in galassie lontanissime. Fenomeni di questo tipo sono stati effettivamente osservati negli ultimi anni e, anche se non possiamo ancora essere del tutto certi sulla loro natura, sembra possibile che essi costituiscano l'ultimo gradino di una sequenza di morti e resurrezioni, una sorta di "ultimo tango fra le stelle". A queste ricerche l'astronomia italiana ha dato un importante contributo attraverso il satellite Beppo Sax che, per la prima volta, ha permesso di individuare con precisione i luoghi dove originano i lampi.

Aver capito le fasi finali dell'evoluzione stellare ha costituito uno dei grandi progressi dell'astrofisica negli ultimi decenni. Si è così scoperto che, almeno per le stelle più massicce, la fine della vita, basata sull'energia nucleare, viene seguita da una seconda vita, con caratteristiche ben diverse. Successivamente, almeno per gli astri che si trovano in sistemi doppi, si apre poi la possibilità di una terza e, spesso, di una quarta fase, ogni volta accompagnata da caratteristiche diverse rispetto a quella precedente. Lo studio di questi fenomeni ha aperto nuove strade alla ricerca astronomica e allo studio della materia in condizioni straordinarie, con gravità fortissime, densità confrontabili a quelle del nucleo atomico, campi magnetici straordinariamente elevati, in genere regimi al di fuori della possibilità di osservazione nei laboratori terrestri. Non per nulla, vale la pena sottolinearlo di nuovo, negli ultimi vent'anni ben quattro premi Nobel sono stati attribuiti per scoperte fondamentali in questo campo di ricerca che appare ancora ben lontano dall'essere esaurito nelle sue potenzialità di future sorprese scientifiche.