

Le stelle

Introduzione

Affascinanti e gigantesche palle di gas incandescente sospese nel vuoto che brillano di luce propria. Tutti conosciamo le stelle. Persino nel cielo delle nostre città, così penalizzate dall'inquinamento luminoso, riusciamo a scorgerne qualcuna. Alcune volte riusciamo persino a distinguerle in base alle differenze di colore e luminosità.

Lo sapevate che noi siamo fatti di polvere stellare? Il ferro del nostro sangue, l'ossigeno che respiriamo, il calcio delle nostre ossa, tutti gli atomi di cui siamo composti, sono stati creati all'interno delle stelle miliardi di anni fa, così come ogni altro elemento presente sul nostro pianeta.

Oltre il sistema solare

Sfere di gas incandescente

Tutti conosciamo le stelle. Persino nel cielo delle nostre città, così penalizzate dall'inquinamento luminoso, riusciamo a scorgerne qualcuna. E forse riusciamo anche a distinguerle in base a differenze di colore e luminosità. In effetti ci sono tanti tipi di stelle e per darne una definizione che le comprenda tutte è necessario spendere qualche parola sulle loro proprietà intrinseche.

Le stelle sono gigantesche palle di gas incandescente sospese nel vuoto che brillano di luce propria. Questa non è esattamente la definizione che potremmo trovare su un qualsiasi vocabolario di lingua italiana, ma probabilmente ci aiuta a focalizzare la vera natura di questi puntini luminosi che da sempre affasciano gli esseri umani.

In effetti tutte le stelle hanno forma sferica o semisferica a causa dell'attrazione gravitazionale. La materia presente nell'universo genera infatti una forza attrattiva solo per il fatto di avere massa. Se la distribuzione di materia è uniforme, come per esempio all'interno di una nube di gas, intorno al centro di gravità la massa tende ad accumularsi in maniera identica da tutte le direzioni, formando quindi corpi celesti di forma sferica. Poiché però la gravità è una forza debole, ne vediamo gli effetti quando le masse in gioco sono molto grandi. Non a caso tutte le stelle hanno dimensioni notevoli. Il Sole ha un diametro di 1,4 milioni di km, oltre 100 diametri terrestri. Ma il Sole è una stella media: i diametri stellari variano da qualche centesimo a qualche centinaio quello solare.

Eppure anche le dimensioni delle stelle, per quanto enormi, sono piccole rispetto alle distanze che le separano. Proxima Centauri, la stella più vicina al nostro Sistema Solare, si trova 250 mila volte più lontana dalla Terra di quanto non lo sia il Sole. La stessa luce di Proxima, pur viaggiando all'incredibile velocità di 300 mila km al secondo, impiega 4 anni per raggiungerci.

Ora sappiamo che le stelle sono enormi sfere disperse nel vuoto degli spazi interstellari. Di cosa sono fatte? Non abbiamo ancora detto nulla sulla loro composizione. Le stelle sono costituite da gas ad alta temperatura. Sebbene esistano numerosi tipi di stelle, l'analisi della luce che emettono ha mostrato che sono composte principalmente da idrogeno (70%) ed elio (poco meno del 30%), gli elementi più semplici e abbondanti dell'universo, oltre a percentuali minime di elementi più complessi come, ad esempio, carbonio, ossigeno, azoto e ferro.

Il gas stellare si trova a temperatura molto elevate. La superficie del Sole si aggira intorno ai 6000 gradi, ma alcune stelle possono essere quasi 10 volte più calde. Ogni corpo circondato da un ambiente più freddo tende a liberarsi della propria energia interna irradiandola sottoforma di luce e calore. Per questo le stelle emettono luce; tanto più sono calde tanto più sono luminose a parità di superficie emittente. La potenza irradiata dal Sole sottoforma di luce e calore è uguale a quella di diecimila miliardi di bombe atomiche esplose su Nagasaki (vedi sezione Il Sistema Solare). E ci sono stelle che sono un milione di volte più luminose del Sole!

Ma c'è di più. Le stelle sono colorate. In una notte invernale, per esempio, osservando la grande costellazione di Orione, si nota che la spalla sinistra del cacciatore è distintamente rossa, mentre il piede destro è decisamente blu. Per un astronomo il colore di una stella fornisce una preziosa indicazione sull'energia a cui viene emessa la maggiore quantità di radiazione. Poiché il modo con cui viene emessa la luce in una stella dipende solo dalla sua temperatura superficiale,

ecco che il colore diventa un indicatore di temperatura. Le stelle più calde, la cui superficie può raggiungere 40mila gradi, emettono soprattutto luce blu, mentre le più fredde, "solo" 2000-3000 gradi, irradiano principalmente una radiazione rossa. Il Sole con i suoi 6000 gradi appare di un colore giallo. In base a questa proprietà è possibile procedere a una classificazione delle stelle; abbiamo così i principali gruppi O, B, A, F, G, K, M dalle più calde alle più fredde.

Sfere di gas in equilibrio

Torniamo alla definizione iniziale che abbiamo dato di stella.

Soffermiamoci innanzitutto a pensare se abbiamo mai osservato un gas assumere una forma definita, come una sfera, in assenza di un contenitore. La risposta ovviamente è no, perché i gas tendono a espandersi ed occupare tutto il volume possibile. Allora come è possibile che il gas delle stelle si trovi confinato in qualche modo e non si disperda nel vuoto? La spiegazione risiede ancora una volta nel comportamento dei gas: comprimendolo, un gas si scalda; scaldandolo, un gas si espande. Le stelle si trovano in un equilibrio idrostatico grazie al bilanciamento tra due forze di uguale intensità ma di verso opposto: la gravità, che tende a far collassare la materia verso il centro, e la pressione determinata dall'espansione del gas caldo, diretta verso l'esterno.

Gli astronomi hanno calcolato che al centro del Sole la temperatura raggiunge i 15 milioni di gradi e che la densità è una decina di volte quella del piombo. Eppure il centro del Sole è ancora gassoso perché a tali livelli di temperatura il gas si trova in uno stato particolare chiamato plasma in cui elettroni e nuclei, svincolati dalla classica struttura atomica, formano nuvole di particelle cariche elettricamente che fluttuano libere; in questo stato la materia è altamente comprimibile rimanendo allo stato gassoso.

Questa eterna lotta di prevaricazione tra forze dura per tutto la lunga vita di una stella. La longevità delle stelle è stato uno dei principali problemi da risolvere dell'astrofisica passata. Gli astri infatti ci appaiono eterni e immutabili rispetto alla durata della nostra vita. Prendiamo per esempio il Sole: poiché la Terra non può esistere senza la nostra stella, sappiamo che il Sole è vecchio almeno quanto il nostro pianeta e cioè 4,5 miliardi di anni. Non solo: i reperti fossili terrestri ci indicano che per tutto questo tempo il Sole ha continuato a brillare pressappoco come fa ai giorni nostri. Il problema dell'età è strettamente collegato al meccanismo di produzione dell'energia emessa. In effetti, tale energia potrebbe provenire unicamente dalla gravità: il Sole contraendosi si scalda e diventa luminoso. Calcoli effettuati sull'energia gravitazionale disponibile ad alimentare il processo dimostrano, però, che il Sole non potrebbe sopravvivere per più di 30 milioni di anni. Deve quindi esserci una fonte di energia alternativa che permetta la longevità osservata.

Sfere che brillano di luce propria

Per trovare il meccanismo in grado di scaldare così tanto il gas e per così tanto tempo dobbiamo tuffarci nel mondo microscopico dei nuclei atomici. Gli atomi possiedono una struttura ben precisa: hanno un nucleo, formato da particelle chiamate protoni e neutroni, intorno a cui orbita una nuvola di particelle più piccole, gli elettroni. Siamo nel mondo dell'infinitamente piccolo: prendiamo un millimetro, dividiamolo per un milione di volte e poi ancora per dieci e otterremo le dimensioni di un atomo. Normalmente gli atomi sono stabili, ma se sussistono particolari condizioni di pressione, densità e temperatura possono avvenire reazioni che trasformano gli atomi di un elemento in atomi di un altro elemento. Il sogno di ogni alchimista!

Il centro di una stella è un enorme reattore nucleare in cui si fondono atomi semplici per creare atomi più complessi. La maggior parte dell'esistenza di una stella è sostenuta dalla fusione dei nuclei di idrogeno in nuclei di elio. L'energia prodotta dalla reazione scalda il gas che si espande, contrastando il collasso gravitazionale, e poi raggiunge la superficie da cui si disperde nello spazio sotto forma di luce e calore. Proprio ora nel nucleo del Sole stanno bruciando 4 milioni di tonnellate di idrogeno al secondo; questo ritmo impressionante rimane invariato praticamente da 5 miliardi di anni e rimarrà costante per altri 5.

Quando finisce il combustibile principale che scalda il gas, si rompe il prezioso bilanciamento tra forze che tiene in vita una stella. Nell'affannosa ricerca di una nuova stabilità, l'astro evolve, instaurando processi di fusione di elementi più pesanti, come ad esempio il carbonio.

Dal centro di una stella come il Sole, poi, l'enorme quantità di energia prodotta risale in superficie alcuni milioni di anni.

Attraversando strati di gas spessi e densi la radiazione non passa indenne; interagendo con gli atomi del gas, l'energia si degrada, un po' come l'energia cinetica di una palla da biliardo quando ne colpisce un'altra. Prima di essere libera, inoltre, l'energia deve passare attraverso uno strato turbolento di gas in cui colonne di gas, come enormi scale mobili, la trasportano letteralmente in superficie. Infine l'energia può disperdersi nello spazio e arrivare fino a noi.

Raggruppamenti stellari

Le costellazioni sono raggruppamenti di stelle che formano in cielo alcuni schemi familiari. Tuttavia, la sfera celeste non è altro che una proiezione bidimensionale dell'universo che ci circonda centrata sul nostro pianeta. Così considerando la terza dimensione, cioè la profondità, stelle appartenenti a una stessa costellazione non sono legate tra loro da alcuna relazione, anzi, si trovano spesso a distanze considerevoli le une dalle altre. La credenza quindi che alcune costellazioni possano avere un'influenza sulla vita delle persone appare quindi del tutto infondata.

Tuttavia, non significa che stelle vivano da sole, tutt'altro. Spesso, infatti, le stelle formano sistemi complessi con due, tre o più componenti tenute insieme dalla mutua attrazione gravitazionale.

La configurazione più probabile è quella delle stelle doppie, coppie di stelle che orbitano intorno a un baricentro comune. Nei sistemi particolarmente stretti, le due componenti possono scambiarsi massa, a volte in misura imponente. L'attrazione gravitazionale della stella più densa e compatta provoca, infatti, il risucchio di materia dalla compagna più espansa, anche se di analoga massa.

Oltre alle doppie, si possono trovare sistemi multipli e veri e propri ammassi, raggruppamenti stellari legati insieme dalla gravità. Questi ultimi si distinguono in due famiglie: gli ammassi aperti e gli ammassi globulari. I primi sono costituiti da un numero che va da una decina a un migliaio di stelle di recente formazione concentrati in una regione con un diametro di una decina di anni-luce. Gli ammassi aperti sono, infatti, testimonianza dell'infanzia delle stelle che tendono a nascere in veri e propri grappoli all'interno del disco della nostra galassia. Su tempi scala di 1 o 2 miliardi di anni gli ammassi aperti sono destinati a disgregarsi: le interazioni gravitazionali agiscono come una fionda ed espellono tutte le stelle dell'ammasso. Numerosi sono gli ammassi aperti sufficientemente vicini a noi da essere visibili a occhio nudo: primo fra tutti per luminosità è quello delle Pleiadi nella costellazione del Toro, a soli 425 anni luce di distanza dalla Terra.

Altra cosa sono invece gli ammassi globulari. Molto più rari di quelli aperti, possono essere costituiti da più di un milione di stelle addensate in non più di un centinaio di anni-luce: sono così densi da sopravvivere per molto più tempo agli assalti gravitazionali che disgregano invece i più giovani ammassi aperti. E, infatti, gli ammassi globulari sono costituiti da stelle molto vecchie, nate quando la galassia era ancora in formazione, e sono distribuiti in un alone sferico intorno al centro. Gli scienziati li studiano proprio perché possono custodire segreti sulla formazione stessa della Via Lattea.

Il problema delle distanze

Uno dei principali problemi in astronomia è la misura delle distanze stellari. Abbiamo già osservato tutti gli oggetti vengono "schiacciati" su una proiezione sferica, detta appunto **sfera celeste**, che ha la Terra come centro. La mancanza della profondità porta inevitabilmente a considerazioni errate di luminosità e distanze tra gli oggetti. Il Sole, per esempio, è un oggetto di medie dimensioni, ma poiché è anche la stella più vicina a noi, ci sembra più grande e luminosa di tante altre stelle che, pur emettendo molta più luce, appaiono piccole e deboli a causa della lontananza. Ci sono diversi metodi per risalire alla distanza tra le stelle; uno di questi sfrutta il fenomeno della parallasse annua. La parallasse è lo spostamento apparente di un oggetto rispetto allo sfondo, quando viene osservato da due punti diversi. Più un oggetto è distante, più questo spostamento sarà piccolo e individuabile aumentando la distanza tra i due punti di osservazione. Poiché le stelle sono molto lontane, per poterne apprezzare la parallasse si fanno le osservazioni a sei mesi di distanza, cioè quando la Terra si trova a due estremi opposti della sua orbita intorno al Sole. Da qui il nome di parallasse annua. Misurando poi l'angolo sotteso a questo spostamento e conoscendo il raggio dell'orbita terrestre, è possibile calcolare la distanza che ci separa dall'oggetto attraverso una semplice regola trigonometrica: $D = R_{terra} / \tan(\theta)$ espressa in parsec. Il **parsec** è l'unità di misura utilizzata dagli astronomi per le distanze nell'Universo; il nome è l'abbreviazione di "**parallasse secondo**" ed è la distanza da cui si vede il raggio dell'orbita terrestre sotto un angolo di 1 secondo d'arco. **1 parsec equivale a 3,26 anni-luce**. Negli anni passati si sono stabilite con notevole precisione le distanze della maggior

parte delle stelle vicine con il metodo parallattico grazie al satellite *Hypparcos*. Tuttavia risulta semplice intuire che la validità di questo metodo è limitata a stelle vicino a noi; per le stelle molto lontane l'angolo parallattico diventa talmente piccolo da non poter essere misurato e bisogna affidarsi a metodi di misurazione indiretti. Per esempio, si considerano alcune stelle variabili, la cui variabilità sia associata alla loro luminosità intrinseca. Misurando poi la luminosità apparente, quella cioè che misuriamo dalla Terra, è possibile risalire alla loro distanza. Appartengono a questa classe di candele campione diversi tipi di oggetti; i più noti sono le cefeidi, stelle piuttosto luminose da poter essere osservate anche nelle altre galassie oltre la Via Lattea. Proprio la precisione nella misura di queste stelle consentì all'astronomo Edwin Hubble di misurare le distanze delle galassie più vicine e scoprirne la recessione, aprendo la strada alla cosmologia moderna e alla teoria del Big Bang. Oggi siamo in grado di valutare, anche se con un ampio margine di errore, distanze galattiche di centinaia di milioni, e addirittura miliardi, di anni-luce.

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°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 milioni di anni, costellata da frequenti fasi di instabilità in cui possono anche subire elevate perdite 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. E' 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 maggiore energia di quanto ne produca; da qui in poi la reazione più vantaggiosa è la fissione nucleare. Non a caso, infatti, durante l'evoluzione di stelle massicce, una volta creato il ferro nel nucleo non sono più possibili altri cicli di fusione.