

**CENTRO OSSERVAZIONE E DIVULGAZIONE  
ASTRONOMICA SIRACUSA**

# **LA VITA DI UNA STELLA**

**Dott. Emerico Amari**

**14 Luglio 2008**

## **INDICE E MAPPA DELL'ARTICOLO**

<b>Capitolo 1: FORMAZIONE DELLE STELLE</b>	<b>pag. 1</b>
<b>1.1 Nascita delle stelle</b>	<b>1</b>
- Globuli di Bok, protostelle, fase di Hayashi e fase di stabilità	
<b>1.2 Grandezze fisiche stellari</b>	<b>4</b>
- Massa, Luminosità, Temperatura e Raggio	
<b>1.3 Meccanismi di funzionamento delle stelle</b>	<b>5</b>
- combustione dell'idrogeno	
- combustione dell'elio	
- combustione del carbonio	
- combustione dell'ossigeno	
- combustione del silicio	
<b>1.4 Dimensioni delle stelle</b>	<b>11</b>
- nane, subnane, sequenza principale, subgiganti, giganti, supergiganti e ipergiganti	
<b>Capitolo 2: PIANETI EXTRASOLARI</b>	<b>15</b>
<b>2.1 Sistemi e pianeti extrasolari</b>	<b>16</b>
<b>2.2 Metodi di ricerca</b>	<b>17</b>
<b>2.3 Risultati della ricerca (tabella pianeti extrasolari)</b>	<b>18</b>
<b>2.4 Curiosità</b>	<b>19</b>
<b>Capitolo 3: IL DESTINO DI UNA STELLA</b>	<b>20</b>
<b>3.1 Nana bianca</b>	<b>20</b>
<b>3.2 Supernovae</b>	<b>22</b>
<b>3.3 Stelle di neutroni e pulsars</b>	<b>24</b>
<b>3.4 Buchi neri (collapstar)</b>	<b>26</b>
<b>Bibliografia</b>	<b>28</b>

## **CAPITOLO 1: FORMAZIONE DELLE STELLE**

### **1.1 NASCITA DELLE STELLE**

Una stella è una sfera di gas caldissimo che produce energia attraverso un processo di fusione nucleare e la riemette sotto forma di radiazione elettromagnetica di qualunque lunghezza d'onda (dai raggi X alle onde radio). Questa sfera di gas è in equilibrio stabile fra la pressione radiativa dovuta alle reazioni termonucleari e la forza di gravità. La composizione in percentuale delle stelle è in media la seguente: 70% idrogeno, 28% elio, 1.5% carbonio, ossigeno, neon e silicio e 0.5% tra ferro, cobalto e nichel ed altri elementi pesanti.

*I corpi celesti hanno una loro vita:* alcune stelle nascono e muoiono nel giro di pochi milioni di anni mentre altre continueranno a brillare per decine di miliardi di anni. L'origine delle stelle va ricercata nelle regioni fredde del mezzo interstellare, dove esiste un'alta densità<sup>1</sup> di gas e polveri. Infatti lo spazio cosmico non è un luogo vuoto di materia così come si crede. Nell'Universo esistono zone fredde con alta densità di gas e polveri chiamate *nubi molecolari*.

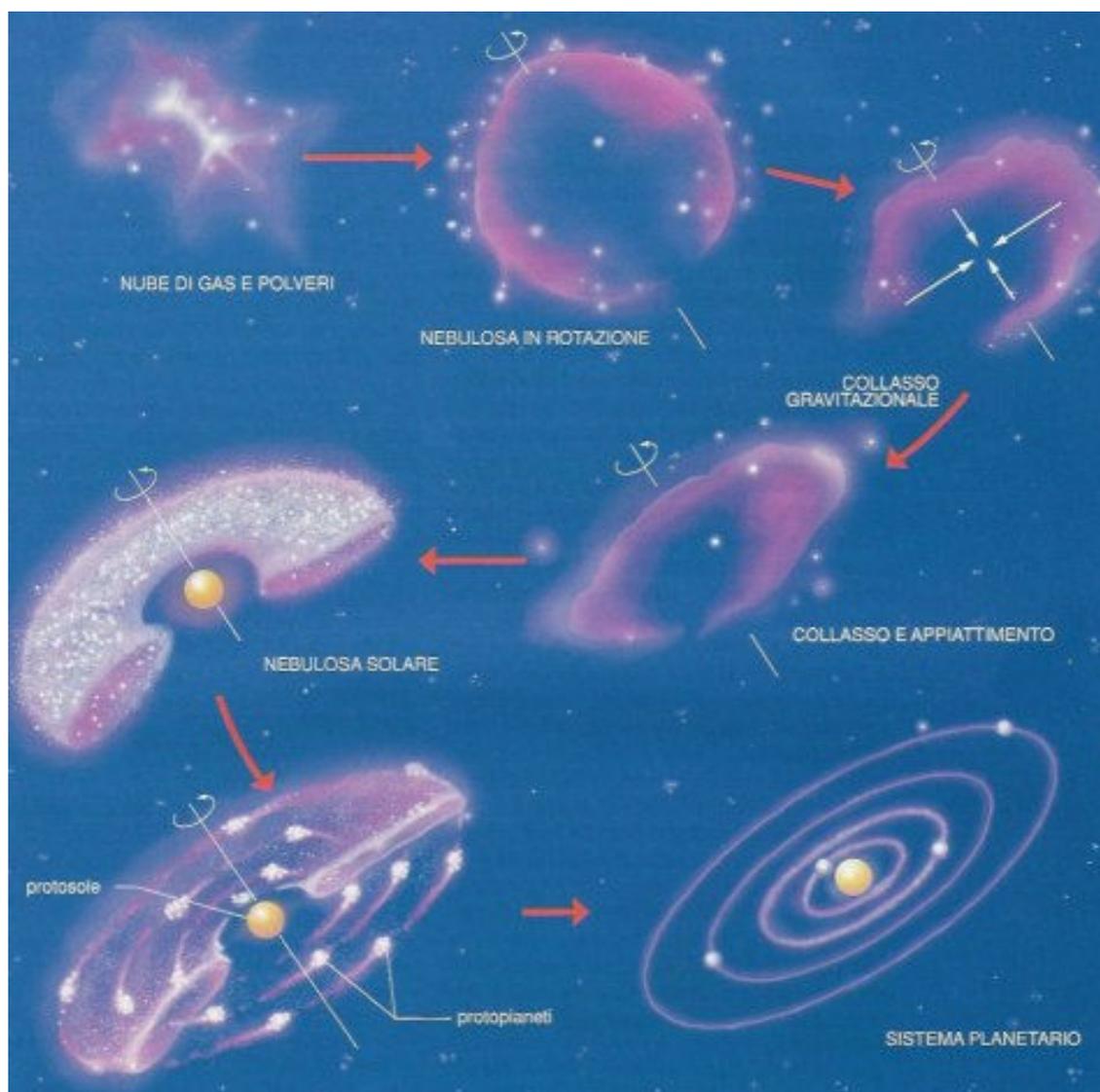
Se una qualche perturbazione (come l'esplosione di una supernova o un vento stellare di particolare intensità) modifica il loro status quo, si crea instabilità gravitazionale nella zona della nube interessata dall'onda d'urto, e le molecole presenti, fino a quel momento in equilibrio, iniziano ad avvicinarsi sempre di più. Così si formano i "globuli di Bok", zone dove esiste un maggiore addensamento di materia, e che, in futuro, a causa della forza gravitazionale, saranno destinate a diventare stelle.

Ciascuna protostella quindi nasce come una bolla di gas di dimensioni pari a diverse volte quelle del nostro sistema solare. Nella fase iniziale la pressione interna o di radiazione non è più sufficiente a contrastare il collasso gravitazionale e quindi la protostella si contrae. L'energia gravitazionale viene convertita in energia termica: il nucleo comincia a scaldarsi. Il giapponese *C. Hayashi* ha calcolato che, in questa prima fase, sono i processi convettivi a trasportare più efficientemente il calore verso la superficie (convezione). Questa può raggiungere una temperatura tra i 2000 e i

---

<sup>1</sup> Poche centinaia di atomi per cm<sup>3</sup>, una quantità ancora milioni di volte inferiore a quella del vuoto più «spinto» che riusciamo ad ottenere sulla Terra.

3000 K<sup>2</sup>, e da questo momento la protostella incomincia a emettere luce (principalmente nel vicino infrarosso). Una protostella con massa uguale a quella del Sole<sup>3</sup> può già arrivare a una luminosità di 1000 volte maggiore di quella solare.



La durata di questa fase, detta di *pre-sequenza*, è pari al tempo-scala di Kelvin-Helmholtz. Questo è il tempo  $t$  necessario per la contrazione di una massa  $M$  entro una sfera di raggio  $R$  con luminosità media  $L$  secondo la relazione:

$$t = \frac{kM^2}{LR} \quad (1)$$

<sup>2</sup> K sta per Kelvin: scala dei gradi assoluti (0° C corrispondono a 273 K).

<sup>3</sup> La massa del Sole è stimata in  $\sim 2 \times 10^{30}$  kg, un due seguito da trenta zeri!

I fisici Lord Kelvin e Hermann von Helmholtz dedussero questa formula quando, verso la metà dell'Ottocento, stimarono, seppure erroneamente, l'età del Sole, considerando la contrazione gravitazionale come unica fonte energetica. In realtà si è osservato che la contrazione caratterizza soltanto la fase iniziale della stella e solo dopo avviene l'accensione delle reazioni termonucleari, che generano energia controbilanciando la contrazione. Nel caso del Sole il periodo di contrazione gravitazionale è durato circa 20 milioni di anni, un tempo molto breve se paragonato alla sua età stimata in circa 4.6 miliardi di anni. Tra tutte le protostelle solo quelle con una massa compresa tra 0.08 e 100 masse solari possono raggiungere la *fase di stabilità*<sup>4</sup>. Le altre stelle terminano la loro vita in due modi:

1. se la massa di partenza è inferiore a ottocentesimi della massa solare allora resteranno oggetti degeneri<sup>5</sup>, freddi e con bassissima luminosità detti *nane brune*<sup>6</sup>. *Tali oggetti sono caratterizzati dall'assenza di reazioni di fusione nucleare al loro interno;*
2. se la massa iniziale supera le 100 masse solari<sup>7</sup> allora si verificherà un'esplosione (ipernova), perché la forza gravitazionale ha il sopravvento sulla pressione radiativa.

---

<sup>4</sup> Fase di stabilità o sequenza principale del diagramma di Hertzsprung – Russell (si veda articolo: Spettri stellari, diagramma HR e indice di colore BV)

<sup>5</sup> Per degeneri si intende privi di reazioni termonucleari.

<sup>6</sup> In molti testi divulgativi spesso il pianeta Giove viene considerato un astro mancato. Questa affermazione è impropria, incoerente con i modelli teorici stellari e con le osservazioni. Infatti, secondo le migliori stime, la massa di Giove è circa un settantacinquesimo del minimo valore richiesto da una stella affinché sia possibile innescare le reazioni di fusione all'idrogeno. In altre parole occorrerebbe una quantità di materia settantacinque volte superiore a quella posseduta da Giove.

<sup>7</sup> Al momento non è confermata l'esistenza di stelle eccezionali o stelle di Trumpler, con masse comprese fra le 200 e 300 masse solari.

## 1.2 GRANDEZZE FISICHE STELLARI

Le grandezze fisiche fondamentali per studiare una stella sono:

- 1) **luminosità L;**
- 2) **massa M;**
- 3) **raggio equatoriale R;**
- 4) **temperatura superficiale T.**

Queste grandezze sono legate da semplici relazioni matematiche. Inoltre se sono note M ed R allora è possibile conoscere la densità media stellare. Dalle misure effettuate dagli astronomi si rilevano i seguenti intervalli di valore delle grandezze stellari: 1) M: [0,08 ; 150]; 2) T: [1.300 ; 150.000]; 3) L: [ $10^{-6}$  ;  $10^6$ ]; 4) R: [ $10^{-3}$  ;  $10^6$ ] <sup>8</sup>

*La luminosità L dipende dalla massa M, in particolare L è proporzionale alla massa al quadrato per le stelle della bassa sequenza principale, mentre per le stelle più massicce è proporzionale alla terza o quarta potenza. La massa M è un indice che misura la quantità di materiale combustibile di una stella. La luminosità L misura il ritmo con il quale la stella brucia il combustibile nucleare.*

Inoltre bisogna ricordare che:

1. **la probabilità che si formi una stella di massa M è inversamente proporzionale alla sua massa.** Ciò vuol dire che è più probabile che nascano stelle di piccola massa (se confrontata con quella del Sole<sup>9</sup>) che stelle di grande massa;
2. **la vita media di una stella in sequenza principale è proporzionale alla potenza -2.5 della massa<sup>10</sup> M** (ad esempio, il Sole trascorrerà  $10^{10}$  anni nella sequenza principale, per una stella di massa doppia del Sole tale periodo sarà di circa 1.8 miliardi di anni, per una di massa tripla 642 milioni di anni, di 10 masse solari: 32 milioni di anni ed infine 25 masse “appena” 5.6 milioni di anni).

---

<sup>8</sup> Le grandezze fisiche massa M, raggio R e luminosità L sono espresse in unità solari.

<sup>9</sup> Ricordo che la massa del Sole è stimata in circa  $2 \times 10^{30}$  kg, un due seguito da trenta zeri!

<sup>10</sup> La vita delle stelle più massicce può “ridursi” a qualche centinaia di migliaia di anni. Fra le stelle più massicce cito: Eta Carinae (150  $M_{\odot}$ ), sistema della Stella di Plaskett (50+50), 34 Cygni (50), Erakis o stella granato (40), Gamma CVn o La Superba (~40), Rigel Orionis e Deneb (25), Betelgeuse e Mirfak (20), Antares (15) e la Stella polare (8-9).

### 1.3 IL MECCANISMO DI FUNZIONAMENTO DELLE STELLE

Nel secolo scorso si riteneva che le stelle emettessero radiazioni per effetto della contrazione che esse subivano sotto l'intensa azione del loro campo gravitazionale. Questo meccanismo non avrebbe potuto fornire abbastanza energia per molti milioni di anni. Inoltre c'erano prove evidenti che l'età del Sole doveva essere di circa 5 miliardi di anni. Si capì presto che le cose stavano in un altro modo! La risoluzione del problema arrivò nel 1939, con gli sviluppi della fisica nucleare. È noto infatti che l'idrogeno è l'elemento più abbondante nell'Universo e quindi nelle stelle. All'interno di una stella per la contrazione si raggiungono enormi valori di temperatura e pressione. In queste condizioni i nuclei di idrogeno (costituiti da un solo protone) si combinano fra loro dando luogo a nuclei di elio (costituiti da due protoni e due neutroni):

- 1)  $\text{protone} + \text{protone} \rightarrow \text{deuterio}^{11} + \text{elettrone positivo} + \text{neutrino elettronico}^{12} + \text{energia}$
- 2)  $\text{protone} + \text{deuterio} \rightarrow {}^3\text{elio} + \text{raggi gamma} + \text{energia}$
- 3)  ${}^3\text{elio} + {}^3\text{elio} \rightarrow \text{protone} + \text{protone} + {}^4\text{elio} + \text{energia}$

Per effetto dei primi due processi si provoca la terza reazione con la conseguenza di aver "bruciato" 4 atomi di idrogeno e prodotto un nucleo di elio. Tale catena di reazioni di fusione nucleare prende il nome di **catena protone-protone** (p-p) o **combustione dell'idrogeno**. Nel processo però si perde una piccola quantità di massa che si trasforma in energia secondo la famosa relazione di Einstein:

$$\mathbf{E} = \mathbf{M} \times \mathbf{c}^2 \quad (2)$$

dove **E** è l'energia totale del sistema, **M** è la massa totale del sistema e *c* è la velocità della luce (circa  $3 \times 10^8$  m/s). *Nel Sole questo difetto di massa ammonta a circa 4 milioni di tonnellate ogni secondo*<sup>13</sup>.

<sup>11</sup> Un nucleo di deuterio è costituito da un protone e da un neutrone.

<sup>12</sup> Il neutrino è una particella elementare con carica elettrica nulla.

<sup>13</sup> Le reazioni termonucleari che avvengono all'interno delle stelle consistono nella fusione di due o più nuclei atomici in un nucleo più pesante. La massa del nucleo risultante è leggermente inferiore alla somma delle masse dei nuclei di partenza. Il Sole perderà nella sequenza principale una massa pari a circa 1000 masse terrestri.

Dopo la sua formazione la stella diventa stabile quando incomincia a produrre energia attraverso la fusione nucleare dell'idrogeno e si stabilisce un equilibrio idrostatico al suo interno cioè la pressione degli strati esterni eguaglia quella della radiazione prodotta all'interno. Affinché la stella raggiunga una temperatura centrale di circa **10 milioni di gradi**, quella necessaria per la fusione dell'idrogeno in elio sono necessarie alcune decine di milioni di anni.

Infatti la fusione di due nuclei atomici è ostacolata dalla reciproca repulsione elettrostatica. Pertanto, è necessario che il gas abbia altissime pressioni e temperature, cioè una grande energia cinetica, per poter vincere la repulsione dei nuclei e riuscire a fonderli. Più grandi sono i nuclei atomici e maggiore è la repulsione elettrica, quindi la temperatura necessaria alla fusione.

**Tutte le stelle iniziano la propria vita bruciando idrogeno nel nucleo e trasformandolo in elio, ma la loro evoluzione successiva dipende dalla loro massa iniziale, quella che possiedono al momento della nascita.**

La massa di una stella determina la quantità di combustibile a disposizione per le reazioni di fusione nucleare. La luminosità è quindi una misura del ritmo con il quale questa materia viene consumata. Perciò il tempo di vita di una stella, cioè il tempo necessario affinché essa consumi tutto il combustibile a sua disposizione, è circa pari al rapporto tra la sua massa e la sua luminosità. Dato che la luminosità aumenta più rapidamente della massa, questo rapporto è tanto più piccolo quanto più massiccia è la stella. Le stelle più calde, massicce e luminose, quelle che popolano la parte alta della sequenza principale, sono dunque quelle che vivono meno a lungo. Le più grandi bruciano idrogeno nel nucleo solo per pochi milioni di anni, mentre le stelle più piccole della sequenza possono farlo anche per centinaia di miliardi di anni. Inoltre, più grande è la massa della stella, maggiore è la temperatura centrale che questa è in grado di raggiungere contraendosi, quindi solo nelle stelle più massicce possono essere sintetizzati gli elementi pesanti. Infine, maggiore è la temperatura e più rapido è il processo di fusione. Via via che una stella esaurisce un combustibile e incomincia la fusione di un elemento più pesante, il processo accelera sempre di più.

---

Un altro dato che interviene nell'evoluzione delle stelle è lo stato fisico del gas al suo interno. Se la densità del gas aumenta oltre un certo limite il gas diventa **degenere**<sup>14</sup>.

In un gas degenere la pressione non dipende dalla temperatura. Se la temperatura del gas aumenta, esso non si espande e l'energia accumulata non può venire dissipata. Oltre un certo limite, questo accumulo di energia rende instabile la stella e ne provoca l'esplosione. Durante la fusione dell'idrogeno in elio, la stella possiede una temperatura  $T$ , una luminosità  $L$  ed un colore ben definiti.

Quando l'idrogeno sta per essere esaurito nel nucleo, l'equilibrio idrostatico che si era stabilito viene a mancare perché l'energia prodotta dalla fusione non è sufficiente a controbilanciare la pressione degli strati esterni della stella. Di conseguenza, il nucleo incomincia a contrarsi e a riscaldarsi, in modo da accelerare la fusione dell'idrogeno restante e dare il via alla fusione di elio in carbonio. Questo produce un sovrariscaldamento della stella, che deve contemporaneamente espandere gli strati più esterni per dissipare l'energia in eccesso. La temperatura superficiale della stella diminuisce, e di conseguenza il suo colore si fa via via più rosso, mentre la luminosità complessiva aumenta, dato che la superficie emittente è aumentata con l'espansione. La stella diventa cioè una gigante rossa, una stella più fredda e più luminosa rispetto alle stelle in sequenza principale. Il suo punto rappresentativo sul diagramma H-R si sposta verso l'alto e verso destra, risalendo il *ramo delle giganti rosse*. Contemporaneamente, la stella comincia a perdere massa, attraverso l'espulsione di parte dei suoi strati più esterni. La massa perduta alla fine di questa fase può essere anche una frazione significativa della massa iniziale della stella.

## COMBUSTIONE DELL'ELIO

Quando la temperatura centrale della stella ha raggiunto circa i **100 milioni di gradi**, i nuclei di elio incominciano a fondersi a tre per volta per formare un nucleo di carbonio. La stella si sposta dalla regione delle giganti rosse ancora verso la sequenza principale.

---

<sup>14</sup> La trattazione dello stato degenere di un gas si deve principalmente al fisico italiano Enrico Fermi. I gas ordinari seguono l'equazione di stato:  $PV = nRT$ , cioè ad un aumento della temperatura  $T$  corrisponde un aumento della pressione  $P$  e quindi un'espansione del volume  $V$  del gas. Un gas diviene degenere se sottoposto a pressioni superiori a 10 milioni di atmosfere e la pressione è proporzionale alla densità  $\rho$  elevata a  $5/3$  e non più legato alla temperatura  $T$ .

Se la stella ha una massa inferiore a circa due volte la massa del Sole, la sua evoluzione attiva termina qui. Le stelle più piccole, infatti, sono più compatte di quelle grandi e, nel loro nucleo, il gas è così denso da raggiungere lo stato degenere: in queste condizioni, non è possibile un'ulteriore contrazione del nucleo, e la stella non può innescare la fusione del carbonio prodotto. Quando l'elio sta per esaurirsi, il nucleo si contrae e gli strati esterni si espandono, per la minore produzione di energia all'interno. Nel diagramma H-R, il suo punto rappresentativo risale verso il ramo delle giganti rosse.

A questo punto, la stella diventa instabile e gli strati più esterni incominciano a pulsare, fino a quando non vengono espulsi in direzione radiale, lasciando scoperto il nucleo caldo e denso della stella: una *nana bianca*. L'insieme della stella centrale e della nube di gas espulso prende il nome di *nebulosa planetaria*. Le stelle più massicce ripetono più volte il ciclo di contrazione ed espansione, innescando ogni volta la fusione di un elemento più pesante all'esaurirsi del combustibile precedente, mentre il loro nucleo si riscalda sempre più. Ecco la sequenza dei cicli:

#### **COMBUSTIONE DEL CARBONIO**

A circa **700-800 milioni di gradi** incomincia la fusione dei nuclei di carbonio, che dà origine ad elementi come l'ossigeno, il magnesio e il neon.

#### **COMBUSTIONE DELL'OSSIGENO**

A temperature di circa **1.4 miliardi di gradi** i nuclei di ossigeno si fondono, formando silicio, zolfo e fosforo proseguendo nella catena dei bruciamenti stellari.

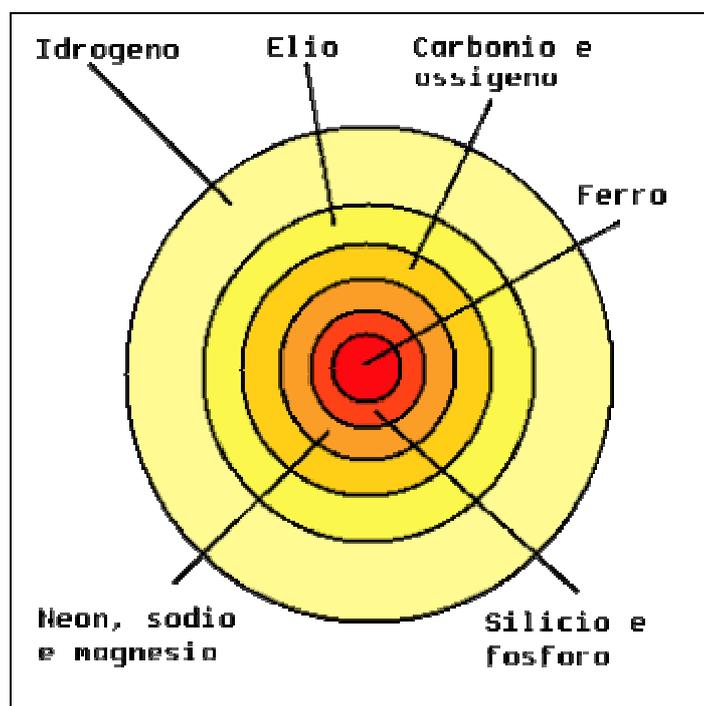
#### **COMBUSTIONE DEL SILICIO**

A **4-5 miliardi di gradi** i nuclei di silicio si fondono formando nichel che decade prima in cobalto e poi in ferro che è stabile. Questa catena si interrompe quando il gas nel nucleo della stella, che ad ogni contrazione è rimasto sempre più denso e compatto, diventa degenere.

**In queste condizioni la stella assume una struttura a cipolla, in cui ogni strato è interessato alla fusione di un elemento. La temperatura, la pressione e la densità crescono con la profondità.**

A questo punto, la fusione del successivo combustibile nucleare rilascia nel gas degenere una grande quantità di energia, che provoca l'esplosione della stella come *supernova*.

**Il gas arricchito di elementi pesanti viene restituito al mezzo interstellare: l'esplosione delle supernovae rappresenta il principale meccanismo di arricchimento chimico delle galassie.**



*Molti studiosi ritengono che questo processo di arricchimento dello spazio interstellare possa generare la formazione di stelle di massa più piccola, confrontabile con quella del sole, ed indurre la probabile formazione della vita sulle future stelle neonate.*

L'astrofisico *Hubert Reeves* in "*L'evoluzione cosmica*" scrive:  
*«le stelle sono la seconda possibilità che si offre all'evoluzione nucleare. Nel loro interno si elaborano i tipi di atomi che presidieranno alla vita. Poche migliaia di anni saranno sufficienti alla produzione di quasi un centinaio di nuovi elementi chimici. Morendo la stella feconda lo spazio con i prodotti della sua cottura interna».*

Così gli strati esterni della stella vengono espulsi nello spazio, mentre il suo nucleo collassa sotto la propria spinta gravitazionale, formando un oggetto estremamente denso e compatto. Solo le stelle con massa superiore a 10-12 volte quella del Sole percorrono tutto il ciclo dei bruciamenti nucleari, arrivando a sintetizzare il ferro, qui la catena si interrompe: la fusione del ferro in elementi più pesanti è infatti endoenergetica, cioè, invece di liberare energia, ne assorbe. Il ferro sintetizzato nel nucleo della stella subisce quindi un'instabilità: i nuclei di ferro si frantumano e, sotto l'enorme pressione alla quale sono sottoposti dagli strati di gas sovrastanti, collassano su se stessi. Il nucleo si contrae, alla ricerca di una nuova configurazione di equilibrio idrostatico. Gli strati esterni cadono sul nucleo a grande velocità, urtando contro la sua superficie estremamente densa. L'onda d'urto che si forma riscalda il gas fino a temperature altissime (decine o centinaia di miliardi di gradi).

In queste condizioni si innescano immediatamente bruciamenti nucleari molto rapidi, che depositano una grande quantità di energia negli strati di gas (struttura a squame di cipolla), facendo esplodere la stella come supernova. La sorte del nucleo, a questo punto, dipende dalla sua massa:

1. se è inferiore a 3.2 masse solari (limite di *Volkoff-Oppenheimer*), i nuclei si fondono con gli elettroni, formando una stella compatta e densissima di neutroni;
2. se invece la massa del nucleo è superiore al limite di *Volkoff-Oppenheimer* nulla può fermare il suo collasso, che diventa irreversibile. Mentre il nucleo si contrae la forza di gravità in superficie aumenta. In accordo con la teoria della Relatività Generale, lo spazio intorno alla stella si deforma, incurvandosi e modificando le traiettorie dei corpi che vi passano vicino. La stella scompare, perché perfino la luce resta intrappolata all'interno del suo enorme campo gravitazionale: si è formato un *buco nero*.

## 1.4 DIMENSIONI DELLE STELLE

*Quanto sono grandi le stelle?* È la classica domanda che il pubblico rivolge agli esperti della materia astronomica. Ad occhio nudo le stelle appaiono oggetti puntiformi incastonati sulla volta celeste e non rivelano il loro aspetto. L'utilizzo di strumenti ottici di notevole portata non risolve il problema. Infatti a qualsiasi ingrandimento le stelle rimangono oggetti non definiti privandoci della possibilità di cogliere dettagli sulla loro superficie. Spesso anche i testi divulgativi trascurano la tematica riservandone solo poche righe o qualche dato. Il concetto di grandezza, intesa come dimensione, è tornata alla ribalta dopo le osservazioni dei satelliti Hipparcos (ESA) e Hubble (NASA) che hanno stimato le dimensioni delle stelle. Quindi come vedremo la risposta risulta alquanto diversificata e dipende dall'oggetto osservato. *A priori possiamo affermare che tutte le stelle che osserviamo ad occhio nudo sono più grandi del nostro Sole.*

Dunque partiamo dal Sole. Sappiamo che esso ha un raggio equatoriale di circa 109 volte quello terrestre cioè di quasi 697 mila km. Sapendo che la stella ha una forma "quasi sferica", il volume di essa è proporzionale alla terza potenza del raggio e si può quindi affermare che la nostra Stella occupa un volume pari a circa un milione di volumi terrestri.

Per il proseguo indicheremo i raggi delle stelle in unità solari secondo l'assunzione  $R = 697 \text{ mila km} = 1$ . A seconda delle loro dimensioni rispetto al Sole le stelle si distinguono in sette classi:

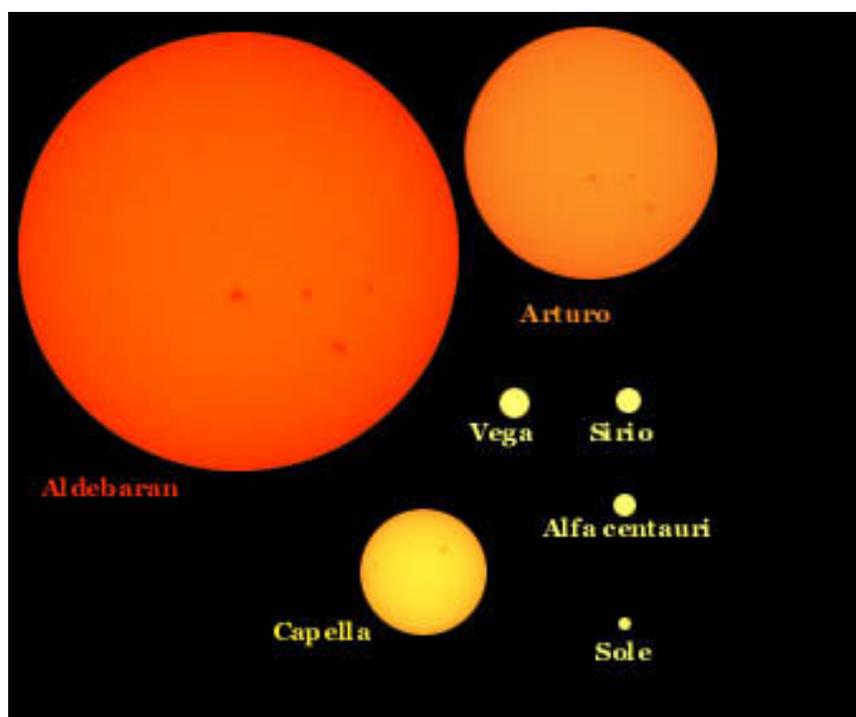
1. **nane** (es. Stella di Kapteyn, Stella di Barnard, Sirio B,..)
2. **subnane** (Proxima Centauri, Mira B,..)
3. **sequenza principale** (Sole, Sirio A, Alfa Centauri, Procione, Vega, Altair,..)
4. **subgiganti** (Capella, Spica, Mintaka, Alnilam, Alnitak, Saiph, Bellatrix,..)
5. **giganti** (Menkar, Arturo, Polare, Mirfak, Rigel, Schedar e Aldebaran,..)
6. **supergiganti** (Deneb, Sadir, Scheat, Enif, Betelgeuse, Gamma Velorum,..)
7. **iperiganti** (Antares, R Sculptoris, R Leporis, Erakis, La Superba)

Questa classificazione non ha dei limiti stretti. Secondo alcuni autori bisognerebbe tener conto anche della luminosità. Infatti conoscendo il raggio e la classe spettrale è possibile calcolare la superficie della stella e quindi la quantità di energia irradiata che è un indice della massa.

I primi due gruppi, nane e subnane, sono contraddistinti da raggi compresi fra un centesimo e un millesimo di quello solare. Sono astri piccoli e densi che trascorrono in s.p. tempi estremamente lunghi<sup>15</sup>.

Le stelle della sequenza principale sono astri simili al Sole<sup>16</sup> e costituiscono la componente preponderante della popolazione stellare. La loro vita è compresa fra qualche centinaio di milioni di anni sino ad una decina di miliardi di anni.

Le stelle subgiganti sono astri che possiedono una decina di raggi solari. Nel diagramma HR occupano la fascia immediatamente sopra quella del Sole. Si tratta di stelle massicce ma meno dense della nostra Stella.



**L'aggettivo subgigante non va interpretato come una classe minorante delle giganti ma piuttosto come uno stadio intermedio fra le stelle della fascia principale e le giganti.** Infatti in alcuni casi sono astri particolarmente luminosi (es. Alnilam<sup>17</sup>, la stella centrale della Cintura di Orione). Per dovere di cronaca alcuni

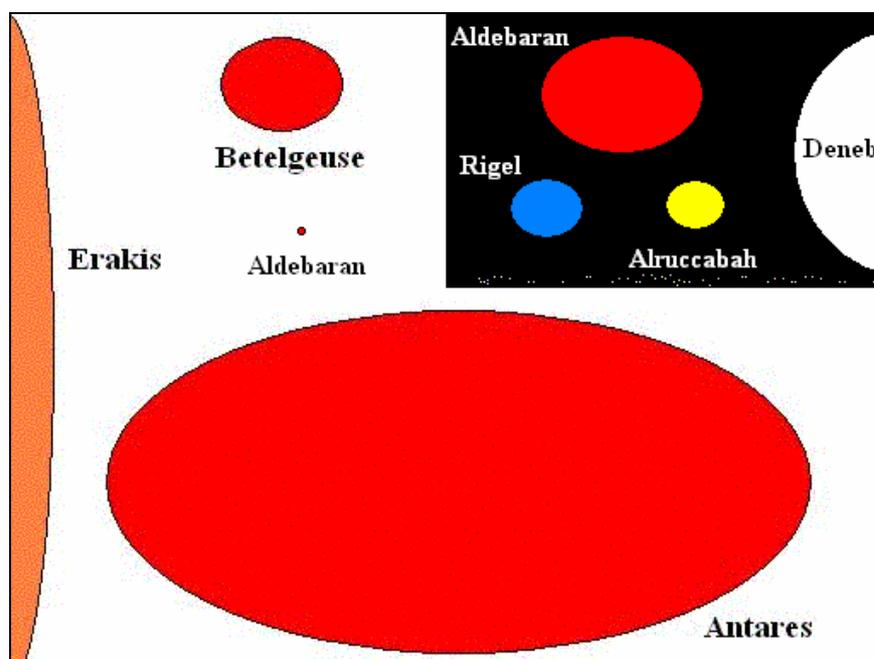
<sup>15</sup> Secondo alcune stime Proxima Centauri trascorrerà in sequenza principale centinaia di miliardi di anni.

<sup>16</sup> Il Sole, per le sue dimensioni, viene considerato una nana gialla.

<sup>17</sup> Alnilam o Epsilon Orionis (secondo la denominazione adottata da Bayer nel 1603) possiede 31 raggi solari e una luminosità (irradiata nella sola finestra del visibile) pari a circa 30500 Soli cioè posta alla distanza di 10 parsec splendrebbe, in pieno giorno, di magnitudine visuale -6.42 .

autori considerano questa stella come una gigante azzurra. Questa affermazione è condivisa solo se si considera la luminosità irradiata.

La classe delle giganti, di ogni colore e temperatura, costituisce la terza classe più numerosa del diagramma HR. Il campione galattico ne conta ben un milione di esemplari. Si tratta di stelle che possiedono da circa 50 a quasi 250 raggi solari. Alcune sono massicce e hanno una densità di molto inferiore a quella solare, così come avviene per quasi tutte le stelle più grandi della nostra.



Le ultime due classi sono rappresentate dalle super e ipergiganti. Alla prima classe appartengono due esemplari noti: Betelgeuse e Mira. Si osservi la figura in cui vengono confrontate le giganti con le super e ipergiganti.

Le ipergiganti sono stelle estremamente massicce ed espanse che certamente termineranno la loro esistenza in modo catastrofico (esplosione di supernova). **Una stella si definisce ipergigante se ha dimensioni tali da superare l'orbita di Saturno.**

In accordo a questa definizione Antares<sup>18</sup>, la stella più luminosa della costellazione dello Scorpione, è una ipergigante rossa perché supera le dimensioni dell'orbita di Saturno (circa 10 UA). Tuttavia bisogna tener conto della luminosità

<sup>18</sup> Antares occupa un volume pari a circa 100 volumi di Betelgeuse.

irradiata e dell'ampia scala di definizione delle ipergiganti. La costellazione del Cigno o Croce del Nord ospita alcuni esemplari di stelle ipergiganti aventi raggi dell'ordine del milione di raggi solari e quindi volumi di oltre un miliardo di miliardi di volumi solari. E il Sole già ne contiene più di un milione di volumi terrestri!

Segnalo anche Erakis o Mi Cephei: una ipergigante visibile ad occhio nudo nella costellazione di Cefeo e riportata nella tabella sottostante.

**TABELLA DIMENSIONI<sup>19</sup> DELLE STELLE:**

<b>N</b>	<b>Tipo di stella</b>	<b>Nome della stella</b>	<b>Raggi solari</b>	<b>Milioni di km</b>	<b>UA</b>
<b>1</b>	Nana bianca	Sirio B, Procione B	<b>0,001</b>	0,006	-
<b>2</b>	Nana bianca	Stella di Kapteyn	<b>0,01</b>	0,006	-
<b>3</b>	Subnana rossa	Proxima Centauri	<b>0,1</b>	0,06	-
<b>4</b>	Sequenza Principale	Sole	<b>1</b>	0,697	-
<b>5</b>	Sequenza Principale	Alfa Centauri o Rigil Kentaurus	<b>2,1</b>	1,46	-
<b>6</b>	Sequenza Principale	Alfa Aquilae o Altair	<b>2,3</b>	1,60	-
<b>7</b>	Sequenza Principale	Alfa Canis Major o Sirio	<b>2,4</b>	1,67	-
<b>8</b>	Sequenza Principale	Alfa Canis Minor o Procione	<b>2,7</b>	1,88	-
<b>9</b>	Sequenza Principale	Alfa Lyrae o Vega	<b>3,6</b>	2,51	-
<b>10</b>	Subgigante azzurrognola	Delta Orionis o Mintaka	<b>17</b>	11,8	-
<b>11</b>	Subgigante azzurra	Zeta Orionis o Alnitak	<b>17</b>	11,8	-
<b>12</b>	Subgigante giallo-arancia	Beta Geminorum o Polluce	<b>18</b>	12,5	-
<b>13</b>	Subgigante gialla	Alfa Aurigae o Capella	<b>23</b>	16	-
<b>14</b>	Subgigante azzurra	Epsilon Orionis o Alnilam	<b>31</b>	21,6	-
<b>15</b>	Gigante arancione	Alfa Bootes o Arturo	<b>69</b>	48	0,32
<b>16</b>	Gigante bianco-giallastra	Alruccabah o Polare	<b>71</b>	49,5	0,33
<b>17</b>	Gigante bianco-azzurra	Beta Orionis o Rigel	<b>99</b>	69	0,46
<b>18</b>	Gigante gialla	Beta Aquarii o Sadal Suud	<b>100</b>	69,7	0,47
<b>19</b>	M. gigante bianco-azzurra	Alfa Camelopardalis	<b>144</b>	100,4	0,67
<b>20</b>	M. gigante giallo-arancia	Alfa Aquarii o Sadal Melik	<b>169</b>	117,8	0,79
<b>21</b>	Maestosa gigante rossa	Alfa Tauri o Aldebaran	<b>219</b>	153	<b>1,01</b>
<b>22</b>	Supergigante bianca	Alfa Cygni o Deneb	<b>297</b>	207	1,38
<b>23</b>	Supergigante rosso-dorata	Alfa Orionis o Betelgeuse	<b>1.516</b>	1.057	7,07
<b>24</b>	Ipergigante rossa	72 Leonis	<b>7.089</b>	4.941	33
<b>25</b>	Ipergigante rossa	Alfa Scorpii o Antares	<b>7.329</b>	5.108	34
<b>26</b>	Ipergigante rosso-cupo	119E Tauri	<b>13.600</b>	9.479	63
<b>27</b>	Ipergigante rosso-cupo	R Sculptoris	<b>41.378</b>	28.840	193
<b>28</b>	Ipergigante rosso-cupo	R Leporis o Stella Cremisi	<b>69.953</b>	48.757	326
<b>29</b>	Ipergigante rosso-cupo	Mi Cephei o Erakis o Granato	<b>112.809</b>	78.628	526
<b>30</b>	Ipergigante rosso-cupo	Gamma Cvn o La Superba	<b>2.675.855</b>	1.865.071	12467

<sup>19</sup> I dati riportati in tabella, per quanto si possa ritenerli, in alcuni casi, abnormi e impropri, sono stati estratti dal software Starry Night Pro versione 3.0 (Hipparcos E.S.A., agosto 1996). Dalla tabella, come già annunciato, Antares è più grande di Betelgeuse. «Antares apparirebbe all'afelio di Plutone di proporzioni mostruose: una palla di fuoco accecante del diametro apparente di 137 gradi!» Si osservi che all'aumentare del raggio della stella, cioè delle sue dimensioni, si passa progressivamente a stelle sempre più fredde.

## CAPITOLO 2: PIANETI EXTRASOLARI

Il sistema solare è costituito da un corteo di pianeti le cui orbite sono fortemente circolari e giacciono all'incirca sul medesimo piano. I pianeti si dispongono nello spazio a distanze sempre più grandi dal Sole, approssimabili secondo la legge empirica di Titius-Bode.

Inoltre le tre leggi di Keplero, scoperte agli inizi del Seicento, affermano che:

1. le orbite dei pianeti sono delle ellissi, ed il sole occupa uno dei due fuochi;
2. il raggio congiungente il pianeta al Sole copre aree uguali in tempi uguali;
3. il semiasse maggiore del pianeta (distanza tra fuoco e punto più lontano dell'orbita) e il periodo di rivoluzione sono legati dalla relazione  $T^2 / a^3 = k$ , dove  $k$  è un parametro dipendente dalla massa del Sole.

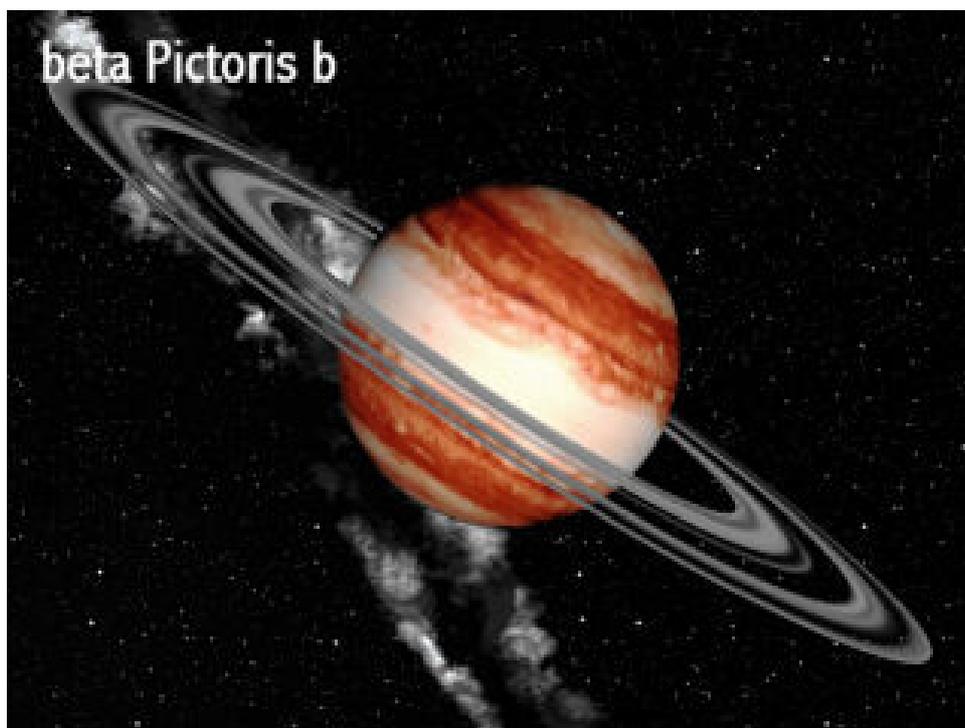


È facile osservare che i pianeti più interni sono quelli più piccoli di massa minore, e composti esclusivamente da materiale roccioso. Al crescere della distanza dal Sole cresce anche la proporzione dell'atmosfera e da Giove in poi i composti gassosi o liquidi prevalgono nettamente su quelli solidi. Il nostro sistema è stato da sempre modello di riferimento per tutti gli ipotetici sistemi extrasolari. Tuttavia le previsioni si sono rivelate apparentemente sbagliate da quando, nel 1995, gli astronomi *Mayor* e

*Queloz* dell'osservatorio di Ginevra hanno annunciato la scoperta di un pianeta orbitante attorno alla stella 51 Pegasi, distante 50 anni luce dal Sole. Questa si è rivelata la prima di una lunga serie di scoperte in successione sempre più rapida, la maggior parte effettuate dallo staff della San Francisco State University dislocato all'osservatorio Keck1 nelle Hawaii.

## **2.1 SISTEMI E PIANETI EXTRASOLARI**

Le recenti scoperte di numerosi sistemi extrasolari hanno confermato che l'esistenza di pianeti attorno alle stelle, non è una peculiarità del nostro Sole, bensì un fenomeno diffuso in tutta la galassia. Tutti i pianeti extrasolari sinora scoperti, sono dei giganti gassosi, simili a Giove e Saturno, e quindi inadatti a supportare la vita come la conosciamo noi, ma l'esistenza di mondi extraterrestri, con forme di vita e civiltà simili alle nostre, è molto più probabile di quanto si possa pensare.



Questi, ed altri sistemi planetari infatti, potrebbero comprendere corpi di tipo terrestre, che potranno essere identificati in futuro, con l'uso di ulteriori e più sofisticati strumenti d'osservazione. I primi risultati ottenuti dagli studiosi in questo campo d'indagine sono giunti nel 1980, quando, attorno alla stella Beta Pictoris, è

stato osservato un disco di gas e polvere (**disco di accrescimento**), dove probabilmente risiede un giovane sistema planetario in via di formazione, che quindi risulta conforme all'attuale modello di origine del sistema solare. Secondo questa teoria infatti, i pianeti si formano a partire da nubi di gas e polvere, che sono i residui della stessa materia interstellare che ha dato vita alla stella attorno a cui orbitano, e che per condensazione ed aggregazione gravitazionale, daranno poi vita ai cosiddetti planetesimi, e quindi ai pianeti.

## **2.2 METODI DI RICERCA**

Il primo pianeta extrasolare scoperto orbita attorno alla stella **51 Pegasi**, la cui massa ammonterebbe a circa 0.5-2 volte quella di Giove. Negli anni successivi il numero di pianeti scoperti è salito vertiginosamente e oggi se ne contano, nel catalogo di Parigi, oltre 200. Tutti questi corpi sono stati individuati attraverso l'influenza da essi esercitata sulle stelle attorno alle quali orbitano, e quindi su metodi indiretti d'investigazione, che permettono comunque di calcolare orbita e massa di eventuali pianeti:

- 1) **Effetto Doppler** - Analizzando lo spettro della luce stellare, si possono rilevare delle piccole oscillazioni della stella, che orbitando assieme al pianeta attorno al comune centro di massa, si allontana e si avvicina alla Terra, provocando uno spostamento delle righe spettrali rispettivamente verso il rosso o verso il blu.
- 2) **Misure astrometriche** - Misurando quei piccoli spostamenti angolari della stella rispetto allo sfondo celeste, che sono causati dalla sua rivoluzione attorno al comune centro di massa.
- 3) **Transito** - Rilevando le periodiche variazioni di luminosità causati dal passaggio del pianeta davanti alla stella.
- 4) **Osservazione diretta** - Attraverso tecniche interferometriche (soppressione della luce stellare e conseguente rafforzamento di quella del pianeta) e coronografiche (creazione di eclissi artificiali).

## **2.3 RISULTATI DELLA RICERCA**

Tutti i pianeti scoperti finora hanno massa simile a quella di Giove, ma con grande sorpresa degli astronomi sono tutti collocati in orbite vicine alla rispettiva stella: cioè in orbite più piccole di quella di Marte e in alcuni casi di Mercurio. Queste osservazioni sono inspiegabili secondo le teorie tradizionali.

La teorica classica della formazione di un sistema solare contempla l'esistenza di una nube di gas e polveri, che per l'azione della propria gravità finisce per collassare verso il proprio centro, dando origine (per ragioni di tipo energetico) ad una struttura discoidale estesa per quasi 200 U.A.. La fase iniziale è la fase più turbolenta, quella in cui s'innescano le reazioni nucleari della stella ed essa emette intensissimi getti di gas dai poli. Lentamente nel disco si sviluppano dei nuclei di accrescimento, presso i quali la materia si raccoglie con composizione dipendente da parametri quali temperatura e intensità del vento solare generato dalla stella. Secondo questo modello, è pressoché impossibile che nelle zone centrali del disco possano formarsi giganti gassosi, sia a causa del vento solare, inizialmente fortissimo ed in grado di spazzare completamente i gas, sia a causa della elevata temperatura, che conferendo alle particelle gassose una grande agitazione termica vincerebbe la forza di gravità esercitata dal protopianeta, e tenderebbe piuttosto a disperderle. All'epoca di un miliardo di anni il sistema planetario dovrebbe essersi quasi completamente formato, e la stella entrerebbe nella fase della sequenza principale nel diagramma HR.

Le soluzioni proposte per le osservazioni ottenute sono di due tipi. La prima propone di identificare nella dinamica interna del disco il principale responsabile delle orbite osservate. Il forte vento solare generato nelle fasi iniziali arriverebbe a generare un anello vuoto nella zona prossima alla stella, relegando la materia densa all'esterno. L'interazione reciproca tra polveri e pianeta finirebbe per spingere quest'ultimo in una zona più interna, facendogli raggiungere una orbita stabile solo a brevi distanze dalla stella.

La seconda contempla il fenomeno dei cosiddetti "Giovi Saltellanti", in cui si evince che è impossibile la convivenza di pianeti giganti collocati a distanze ravvicinate (2-3 U.A.): l'instabilità dinamica derivante finirebbe per espellerne uno dal sistema planetario, farne decadere uno in un'orbita interna e lasciare l'ultimo a grande distanza dalla stella.

Entrambi le teorie presentano dei punti deboli: la prima non spiega l'esistenza di pianeti giganti in orbite esterne, impone la formazione dei pianeti contemporaneamente alla nascita della stella (che invece avviene molto prima) e pone delle restrizioni sul numero dei protopianeti possibili. La seconda non spiega con precisione l'esistenza di pianeti giganti *molto* vicini alla stella, ma è nel complesso la più promettente.

**Tabella: Pianeti extrasolari**

stella	distanza a.l.	massa stella (in soli)	periodo orbitale (in giorni)	eccentricità $e$	massa pianeta (in Giovi)	semiasse maggiore (in U.A.)
47 UMa	46	<b>1,1</b>	1,10	0,03	<b>2,4</b>	2,1
16CygB	72	<b>1,0</b>	802,00	0,57	<b>1,7</b>	1,7
70Vir	59	<b>0,9</b>	116,60	0,40	<b>6,8</b>	0,5
HD114762	90	<b>1,1</b>	83,93	0,34	<b>11,6</b>	0,4
Rho CrB	57	<b>1,0</b>	39,65	0,04	<b>1,1</b>	0,2
Rho Cnc	44	<b>0,8</b>	14,64	0,03	<b>0,9</b>	0,1
<b>Ups. And</b> <sup>20</sup>	44	<b>1,2</b>	4,61	0,10	<b>0,7</b>	0,1
51 Peg	50	<b>1,0</b>	4,23	0,01	<b>0,4</b>	0,1
Tau Boo	49	<b>1,2</b>	3,31	0,01	<b>3,7</b>	0,1
14Her	55	<b>0,8</b>	1619,00	0,35	<b>2,5</b>	3,3
Gliese876	15	<b>0,3</b>	60,54	0,27	<b>2,1</b>	0,2

## 2.4 CURIOSITÀ

*Geoffrey Marcy et al.* hanno già scoperto oltre 50 pianeti extrasolari e stimano che il loro numero nella sola Via Lattea ammonti ad almeno 12 miliardi.<sup>21</sup> Tra i pianeti finora scoperti alcuni orbitano attorno a gigantesche stelle come Iota Draconis, altri attorno a stelle doppie come U Geminorum e Mizar o a una pulsar come PSR 1257+12. Molti pianeti gassosi potrebbero avere lune abitabili! Il pianeta più vicino dista 10 anni luce e ruota intorno alla stella **Epsilon Eridani** mentre il più lontano dista 17000 anni luce. Il più piccolo, 40 volte la massa della Terra, orbita intorno alla stella HD49674 in Auriga. Il più grande, 5.400 volte la massa della Terra, è legato alla stella HD168443. Il sistema solare più simile al nostro è quello della stella **55 Cancri**, attorno alla quale orbitano almeno due pianeti simili a Giove e forse un terzo di tipo terrestre.

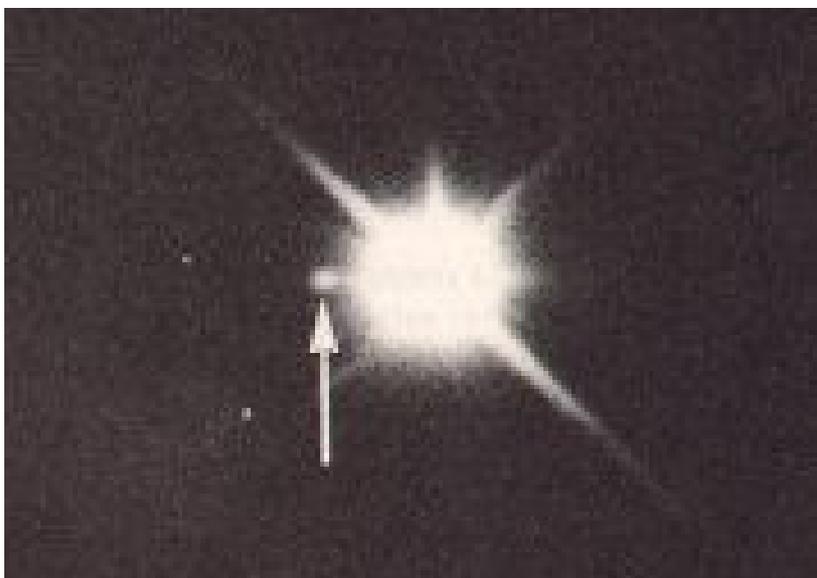
<sup>20</sup> Upsilon Andromedae sono state trovate recentemente delle evidenze che sembrerebbero rivelare l'esistenza di altri due pianeti, di taglia minore (0,7 e 0,4 masse gioviane), con due orbite lontane ed estremamente eccentriche. Si attendono ancora conferme in merito.

<sup>21</sup> Nel Settembre 2007 utilizzando il telescopio europeo VLT (Very Large Telescope) in Cile alcuni astronomi potrebbero aver ripreso per la prima volta un pianeta extrasolare. Sarebbe del tipo gigante gassoso, con una massa quasi duemila volte quella della Terra. Occorreranno però altre analisi prima di poter affermare con certezza che si tratta di un pianeta e non di una piccola stella. Nessuno degli oltre 200 pianeti extrasolari finora conosciuti è mai stato osservato in modo diretto!

## CAPITOLO 3: IL DESTINO DI UNA STELLA

### 3.1 NANE BIANCHE

**Le nane bianche rappresentano lo stadio finale della vita di stelle di piccola massa.** Il prototipo di questo tipo di stelle è Sirio B, la compagna della stella Sirio, con la quale forma un sistema binario (la massa di Sirio B è stimata in 1,02 masse solari e orbita ad una distanza dalla compagna di 24 UA in circa 50 anni). Durante e dopo la fase di gigante rossa, come è stato già osservato, la stella si spoglia dei suoi strati esterni e la parte restante va incontro ad un rapido collasso. Se la massa rimanente, quella del nucleo stellare, è inferiore ad un certo limite critico (limite di Chandrasekhar) pari a 1.4 volte la massa del Sole, il collasso ad un certo punto si arresta e la stella trova una configurazione di equilibrio stabile, diventando una nana bianca. Tanto maggiore è la massa della stella, tanto minore è il raggio finale della nana bianca. Questo tipo di stella è molto piccola, densa e compatta e in rapida rotazione.



La temperatura superficiale di una nana bianca varia da 10.000 K a 200 mila K, mentre la temperatura della shell più interna si attesta intorno ai 10 milioni di K. Le dimensioni sono tipiche di un pianeta come la Terra con periodo di rotazione di appena 5 minuti. Possiede un forte campo magnetico con valori fino a 10 milioni di G.

Il gas della nana bianca è completamente degenere, ad eccezione di un piccolo strato superficiale di materia che si trova allo stato fisico ordinario, prevalentemente idrogeno ed elio. La degenerazione di un gas (di elettroni, di neutroni o di ioni) si instaura quando esso viene compresso fino oltre una certa densità critica. In un gas degenere, nello spazio normalmente occupato da un solo atomo si trovano centinaia di migliaia di particelle. In una nana bianca, la materia è compressa fino a densità di  $10^6$  -  $10^7$  grammi per  $\text{cm}^3$ : a queste densità, una quantità di materia delle dimensioni di una zolletta di zucchero avrebbe la stessa massa di un'automobile.

Pur essendo così compressa, la materia al suo interno si trova però allo stato gassoso, contrariamente a quanto avverrebbe per la materia normale, che ad alte pressioni solidifica. Un gas degenere è estremamente resistente ad un'ulteriore compressione, perché esercita esso stesso una fortissima pressione: è questa pressione che sostiene la nana bianca. La stella non può più contrarsi ed innescare la fusione nucleare al suo interno: una nana bianca perciò è una stella "morta", destinata a splendere a spese della sua energia interna, senza poterne produrre di nuova. Il suo raffreddamento, fino a temperature prossime allo zero, richiede svariati miliardi di anni. Tenendo conto che l'età dell'universo è di 15-20 miliardi di anni, è probabile che nessuna nana bianca sia ancora giunta alla sua morte termica o nana nera.

### 3.2 SUPERNOVAE

L'esplosione di una stella avviene al termine della sequenza dei bruciamenti nucleari. Gli strati esterni cadono sul nucleo riscaldandosi, e si innescano delle reazioni di fusione termonucleare. Esse producono una grandissima quantità di energia, che si deposita nel gas sotto forma di energia cinetica: gli strati vengono espulsi a velocità (decine di migliaia di chilometri al secondo), in un'esplosione immane.

L'energia sviluppata da una supernova è tale che per qualche settimana essa emette, da sola, la quantità di luce emessa da un'intera galassia! La luce emessa dalla supernova si affievolisce e scompare nel giro di qualche anno, lasciando una nube di gas in espansione rallentata. I resti di supernova, cioè il gas espulso nell'esplosione, compongono alcune delle più belle nebulose che conosciamo. Al centro della supernova resta un buco nero oppure una stella di neutroni.

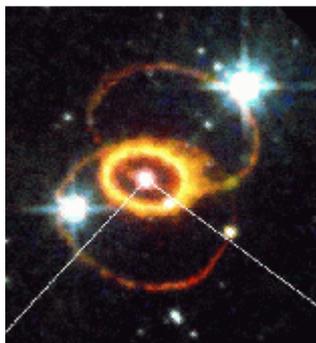
L'esplosione libera nello spazio interstellare gas ad altissima temperatura, fortemente ionizzato, raggi cosmici. Gli elettroni liberi e gli ioni portano con sé un intenso campo magnetico. Se attorno alla supernova c'è del gas interstellare, il materiale espulso lo comprime e viene rallentato a sua volta e il gas interstellare viene riscaldato ed emette radiazione. Il gas in espansione assume via via una struttura a filamenti e a strati sottili, sfilacciati. Il resto di supernova emette radiazioni di vario tipo: ottiche, radio, infrarosse, X e gamma. Anche quando esso si è raffreddato, emette radiazione di sincrotrone, causata da un rapido moto degli elettroni liberi attorno alle linee del campo magnetico del gas. L'emissione X viene invece prodotta nell'interazione degli ioni e degli elettroni col gas interstellare.

Dato che le stelle di grande massa sono solo una piccola frazione del totale, l'esplosione di una supernova è un evento piuttosto raro: si stima che nella nostra Galassia esplodano in media tre supernovae al secolo<sup>22</sup>. Le supernovae sono ben visibili tuttavia anche in galassie esterne, anzi rappresentano uno dei migliori modi per stimarne la distanza.

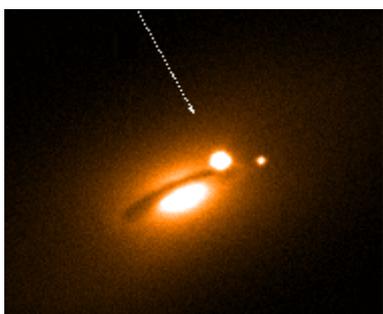
**Il ruolo delle supernovae nell'evoluzione delle galassie è fondamentale, non soltanto perché esse arricchiscono il gas interstellare di elementi pesanti, ma anche perché, attraverso una compressione dello stesso gas, inducono la formazione di nubi dense e quindi di nuove stelle.**

---

<sup>22</sup> Per approfondire la tematica si veda l'articolo "*Supernovae nella Storia*".



*L'evoluzione del resto della supernova 1987A dal febbraio 1994 al febbraio 1996. I resti della supernova, esplosa nella Grande Nube di Magellano nel febbraio del 1987, si stanno espandendo con una velocità di più di 10 milioni di chilometri all'ora ! Dieci anni dopo l'esplosione, il resto di supernova è abbastanza grande da poter essere risolto dal Telescopio Spaziale Hubble. La supernova dista 167 mila anni luce dalla Terra, nella Grande Nube di Magellano. La sua esplosione ha rappresentato un'importante occasione per mettere alla prova le teorie dell'evoluzione stellare. (HST)*



*SN 1994D in NGC 4526. La supernova, indicata dalla freccia, e' apparsa in prossimità di una "dust lane" (zona altamente assorbita dalla polvere) della galassia progenitrice (Patat et al. 1994)*

### 3.3 STELLE DI NEUTRONI E PULSARS

**Dopo l'esplosione di una stella massiccia può restare un nucleo estremamente denso di neutroni degeneri, che viene detto stella di neutroni.**

Nel 1932 il fisico russo Lev Davidovic Landau propose l'idea di una stella composta di soli neutroni. La stessa idea fu proposta da due fisici americani, Fritz Zwicky del California Institute of Technology e Walter Baade dell'osservatorio di Mount Wilson, due anni dopo. Le eccezionali proprietà teorizzate non furono però accettate dalla Comunità scientifica dell'epoca. La stella avrebbe dovuto avere una massa pari a quella del Sole contenuta dentro una sfera di 10 km di diametro.

Solo nel 1967 si ebbe la prima osservazione, eseguita da Jocelyne Bell, di una stella di neutroni: ma questa interpretazione giunse solo dopo lunghe analisi. Per questa classe di oggetti si coniò il nome di pulsar, cioè sorgenti radio pulsanti. Il periodo dell'emissione pulsata è in genere molto breve. Alcune superano i 1000 giri al secondo. All'inizio del 1969, con il telescopio dell'osservatorio Steward in Arizona, si osservò per la prima volta una pulsar nel visibile, la NP 0532. Questa pulsar coincideva con il nucleo residuo della supernova esplosa nel 1054, la Nebulosa del Granchio, una delle supernovae storiche<sup>23</sup>. Fino a quel momento si riteneva ancora che tutte le stelle finissero la loro esistenza come nane bianche, indipendentemente dalla loro massa iniziale.

Una stella di neutroni è un oggetto estremamente denso, in cui la densità raggiunge valori compresi fra  $10^{13}$  e  $10^{18}$  grammi per  $\text{cm}^3$ . A queste densità una quantità di materia delle dimensioni di una zolletta di zucchero avrebbe la stessa massa di tutta l'umanità. Il campo gravitazionale<sup>24</sup> è talmente forte che la velocità di fuga è circa 2/3 della velocità della luce. Possiede un enorme campo magnetico. Nelle stelle di neutroni può raggiungere valori estremi, dell'ordine di  $10^{18}$  G, un uno seguito da 18 zeri! Per confronto il campo magnetico solare è di 1 G.

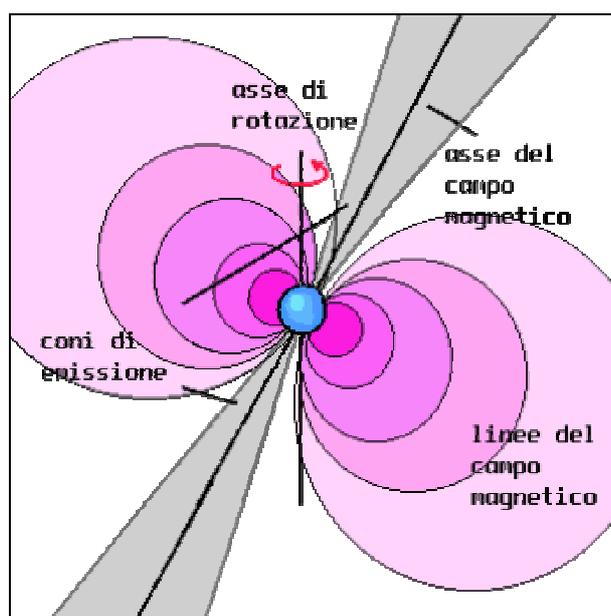
La combinazione della rotazione e dell'intenso campo magnetico, suggerì nel 1969 a Peter Goldreich del California Institute of Technology, la possibilità che una stella di neutroni emettesse fasci di particelle (elettroni e protoni) lungo l'asse magnetico.

---

<sup>23</sup> Per chi desidera approfondire le tematiche esposte si vedano i seguenti articoli: *Supernovae nella Storia e Nane bianche, stelle di neutroni e pulsars*.

<sup>24</sup> L'accelerazione di gravità in superficie in una stella di neutroni è stimata in  $10^{12} \text{ m/s}^2$ , cioè circa  $10^{11}$  g. Pertanto se ne deduce che la gravità cambia molto rapidamente con il raggio R. Si pensi che la caduta di un grave produrrebbe anche onde gravitazionali.

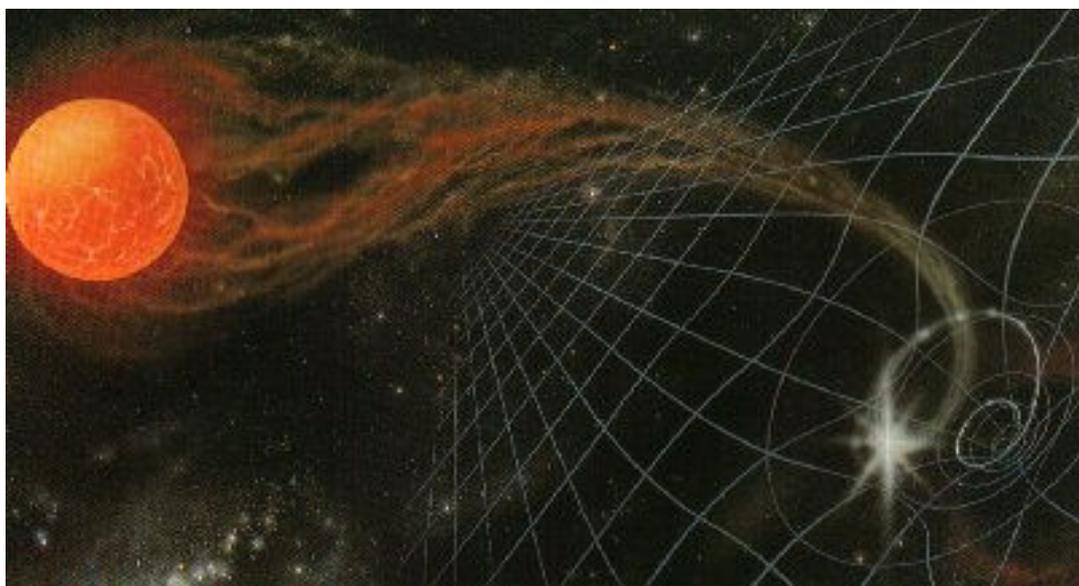
Non coincidendo l'asse magnetico con l'asse di rotazione, il fascio di particelle verrebbe a spazzare un cono durante la rotazione della stella. Queste particelle spiraleggiando produrrebbero la cosiddetta *luce di sincrotrone*, prevalentemente nella direzione del fascio di particelle. L'emissione della pulsar è analoga a quella di un faro in un porto: solo se l'osservatore si trova entro il cono di luce può ricevere il segnale, e lo riceverà in impulsi distanziati di un intervallo pari al periodo di rotazione del faro.



Non tutte le supernove generano delle pulsars: solo quelle di tipo II, cioè quelle in cui si verifica un violento collasso gravitazionale di grandi masse. Il periodo di rotazione di una pulsar è destinato ad aumentare nel tempo: l'energia irradiata, come luce e come onde gravitazionali, va a scapito dell'energia rotazionale e quindi la rotazione rallenta. Tanto più è veloce la rotazione della pulsar tanto maggiore è il rallentamento. Durante il regolare rallentamento, si osservano anche alcuni salti improvvisi (*starquakes*) cioè assestamenti della crosta superficiale della stella. Sotto questa crosta, spessa circa 1 km e ricca di ferro, si prevede uno strato di neutroni superfluidi. Nel nucleo della stella di neutroni è poi teorizzato un nucleo superfluido di neutroni e superconduttore di protoni (iperioni). Esistono stelle di neutroni che sono membri di sistemi binari.

### 3.4 BUCHI NERI (COLLAPSTAR)

Nel 1783, il reverendo filosofo inglese John Michell introdusse l'idea di "stella nera", cioè di una stella con un campo gravitazionale così intenso da avere una velocità di fuga uguale a quella della luce. La stessa idea fu condivisa nel 1798 dal matematico francese Pierre-Simone de Laplace. Un buco nero è il residuo di un collasso gravitazionale di grande entità, nel quale è possibile definire una superficie e un centro. La superficie di un buco nero si chiama orizzonte degli eventi ed è la superficie sferica intorno al buco nero dove la velocità di fuga diventa uguale alla velocità della luce. Il centro è la singolarità. La distanza tra la singolarità e l'orizzonte degli eventi si chiama raggio di Schwarzschild.



Fu proprio l'astronomo tedesco Karl Schwarzschild che nel 1916 risolse le equazioni di Einstein della teoria della Relatività Generale nel caso del buco nero. Il raggio di Schwarzschild  $R$  è legato alla massa del buco nero  $M$  dall'equazione seguente:

$$R = \frac{2GM}{c^2} \quad (3)$$

dove  $G$  è la costante di gravitazione universale e  $c$  è la velocità della luce. Per una massa come quella del Sole il raggio di Schwarzschild è pari a 3 km, mentre per la Terra questa dimensione è di circa un centimetro!

L'orizzonte degli eventi, come suggerito dal matematico inglese Roger Penrose nel 1969, fa le veci di un censore cosmico. Secondo la Relatività Generale la geometria dello spazio-tempo viene distorta in presenza del campo gravitazionale. Se il campo è molto forte la distorsione aumenta, fino a diventare, nella singolarità, una distorsione infinita.

Per esempio alla distanza di qualche unità astronomica il campo gravitazionale di un buco nero di 10 masse solari è già analogo a quello di una stella di massa simile. L'attrazione gravitazionale del buco nero è così forte che niente può uscire dall'orizzonte degli eventi, nemmeno la luce. In questo senso, non è possibile osservare un buco nero così come si osserva una stella.

Una possibilità di individuare un buco nero è quella di osservare la deviazione dei raggi di luce. Dato che lo spazio è curvato vicino al buco nero, un raggio di luce che arriva da una stella lontana viene deviato. Può accadere che venga deviato proprio in direzione della Terra, nel qual caso si osserva un'immagine distorta, o sdoppiata, o moltiplicata, della stella lontana. Si tratta di un effetto di lente gravitazionale.

Migliori possibilità di osservare buchi neri sono fornite da sistemi binari stretti formati da una stella e un buco nero. In questi casi la fortissima attrazione gravitazionale del buco nero cattura il gas della stella. Questo gas orbita sempre più strettamente intorno all'orizzonte degli eventi, diventando per attrito incandescente, fino a superare i due milioni di gradi. Il risultato è un disco di accrescimento intorno al buco nero, che diventa una fortissima sorgente di raggi X.

**Cygnus X-1** (nei pressi di Eta Cygni) è una fortissima sorgente che mostra fluttuazioni della sua emissione nell'ordine delle decine di millisecondi. Dopo lunghe osservazioni gli astronomi sono riusciti a identificare una stella supergigante azzurra (spettro B0) di 30 masse solari (HDE 226868) come compagna di un oggetto invisibile, con massa almeno 16 masse solari. È una massa troppo grande per una nana bianca o per una stella di neutroni, e rimane solo la possibilità che sia un buco nero. Esistono parecchi altri sistemi binari che sono buoni candidati per ospitare un buco nero. Oggi si ritiene che i buchi neri siano oggetti piuttosto comuni.

## **BIBLIOGRAFIA**

1. E. Amari, “*Viaggio fra le Stelle – Guida alle costellazioni per l’astrofilo*” (2004) - pubblicazione CODAS;
2. Luca Amendola, “*Il Cielo Infinito*” – La Nuova cosmologia: inflazione, materia oscura, frattali (2000);
3. Piero Bianucci, “*Stella per Stella – Guida turistica dell’Universo*” (1985) - Edizione Giunti Martello;
4. De Agostini, “*L’Universo - La Grande Enciclopedia dell’Astronomia*” (1997);
5. Stephen Hawking, “*Dal Big Bang ai buchi neri – Breve storia del tempo*” (1988) Biblioteca Universale Rizzoli (Supersaggi Quattordicesima ristampa);
6. Charles Kittel, Walter D. Knight, Malvin A. Ruderman, “*La fisica di Berkeley*” – Vol. I “*Meccanica*” (1970) - Zanichelli Bologna;
7. Hubert Reeves, “*L’evoluzione cosmica – La Storia della materia dalle origini dell’universo a oggi*” (1981) - Biblioteca Universale Rizzoli;
8. Roman e Hannelore Sexl, “*Nane Bianche Buchi Neri - l’astrofisica relativistica*” Universale scientifica Boringhieri, volume doppio (1981);
9. Sito CNN, “*Neutron star Scorpius in intergalactic thriller*” - June 6, 2001;
10. Sito <http://www.seds.org/> (SN 0185, SN 1006, SN 1054, SN 1181 e SN 1885);
11. Giovanni Treccani, “*Scientifica Treccani*” Istituto della Enciclopedia Italiana;
12. Wikipedia, the free encyclopedia: “*stelle ed evoluzione stellare*”.

### **Chi è l’autore dell’articolo?**

E. Amari, fisico e docente di fisica, è socio CODAS. I suoi studi riguardano le stelle, le costellazioni, la storia delle supernovae e la relazione fra l’attività solare e la Terra. È autore dell’opera “*Viaggio fra le Stelle*” – Guida alle costellazioni per l’astrofilo (2004), disponibile presso la biblioteca CODAS. Nel centenario della catastrofe di Tunguska ha realizzato un ciclo di conferenze dal titolo “La Notte dei Bolidi”.