

Planetario di Caserta

STELLE E VITA E LA VITA DELLE STELLE

ovvero

L'EVOLUZIONE DEGLI ELEMENTI NELL'UNIVERSO

Prof. Luigi A. Smaldone

Dipartimento di Fisica - Università degli Studi di Napoli Federico II

Planetario di Caserta

smaldone@unina.it

Introduzione. Domenica mattina; una noiosa sveglia suona rumorosamente riportandoci alla realtà. Il rito del caffè, la stimolante sensazione di una doccia, il giornale fresco-fresco dall'edicola: è una pigra, soleggiata domenica ed i grossi spunti di riflessione sulla vita che si offrono a noi ... ci lasciano indifferenti. Il metallo della sveglia, l'aria che respiriamo, i diversi composti chimici che formano l'aroma ed il gusto del caffè (quello buono ... s'intende!), i costituenti del giornale e del suo inchiostro, l'ossigeno e l'idrogeno dell'acqua della doccia hanno una lunga storia da raccontarci. Senza neanche scomodare il caffè ed il resto, basta guardare in sé stessi (per carità ... niente a che fare con *l'esame di coscienza*) e ritrovare la storia dell'Universo. E' tutta scritta negli atomi che costituiscono il nostro organismo; rispondere alla domanda *dove sono stati prodotti i nostri atomi di idrogeno, ossigeno, carbonio, azoto, ferro?*, come vedremo nel seguito, ci costringerà a ripercorrere fino in fondo i 14 miliardi di anni di vita dell'Universo. Per chi avrà il coraggio (... la pazienza e la costanza) di giungere al fondo di questa storia ... le sorprese ed i colpi di scena non mancheranno.

Homo sapiens e dintorni. Prima di tutto la chiarezza : d'accordo è domenica ... ma la storia ha tutta l'aria di un giallo poliziesco e, come Scotland Yard ci insegna, bisogna procedere con *metodo scientifico*. Occorrono *dati* concreti e non bisogna sbuffare se mettiamo in campo un pò di numeri. Quelli che ci serviranno sono stati tutti raccolti nella Tabella 1. Alla prima occhiata potrebbero impressionarci (principalmente il *logaritmo*, lo avete già incontrato diverse volte, forse di sfuggita, ma con un pò di aiuto la memoria ritornerà e si sarà in grado di ricostruirne perfino *l'identikit*), ma pian piano incominceremo ad interpretarli.

La composizione chimica del corpo umano la si può trovare in un qualsiasi testo di Chimica Biologica, la parte più importante è, invece, metterla in forma utile ai confronti (simili a quelli all'*americana*, la fila di persone sospette allineate ed illuminate contro un muro dotato di una scala graduata). L'elemento chimico è individuato univocamente da un numero, il numero atomico (o numero di protoni contenuti nel nucleo), questo permette più agevolmente di ordinarli in un grafico (e poi l'anno di Chimica ci permette facilmente di associare a 1 l'idrogeno, 2 l'elio, 3 il litio etc., sono un pò come in prigione, hanno perso il nome per acquistare il numero di matricola). Un altro passo è quello di usare una scala conveniente per misurare il numero di atomi: ci saranno elementi molto abbondanti ed altri molto più rari; questo è un punto molto delicato, se non si sceglie la scala opportuna, si rischia di riempire pagine intere di numeri. La mia scelta, che è anche una convenzione usuale in astrofisica, è stata di riportare il numero di atomi presenti per ogni 1'000'000'000'000 (mille miliardi = 10^{12}) di atomi di idrogeno (l'elemento di gran lunga più abbondante) ed ho utilizzato una scala logaritmica. Il numero di atomi di un particolare elemento, per ogni 10^{12} atomi di idrogeno, è 10 elevato al numero riportato in Tabella 1 o, in modo un pò approssimato (ma salva quelli che hanno problemi col resto del salumiere!), **uno** seguito da un numero di zeri uguali al numero prima della virgola in Tabella 1. Il vantaggio del logaritmo (anche per la salvaguardia dell'ambiente) lo si capisce dalla Figura 1. Volendo usare una scala lineare, invece della logaritmica, avremmo dovuto usare un foglio lungo una decina di chilometri per riportare, in maniera apprezzabile, gli elementi più abbondanti e quelli meno abbondanti (quanti alberi abbiamo salvato con questa operazione!). Anche se *logaritmo* fa un pò rabbrivire, è un qualcosa di estremamente naturale (vi prego, non

sussurrate che anche la stricnina è un prodotto naturale); tutti i nostri sensi rispondono in modo logaritmico. Se così non fosse, dovremmo sostituire in continuazione i nostri occhi passando dal giorno alla notte, dall'ombra alla piena luce per non restare completamente abbacinati dalla luce o totalmente ciechi. Lo stesso dicasi dell'orecchio (la misura in dB -*decibel*- del livello del rumore di una moto o in una discoteca altro non è che 10 per il logaritmo dell'intensità). La misura dell'acidità delle soluzioni attraverso il *pH* (ancora un logaritmo!), deriva

dalle prime analisi del gusto dei liquidi (anche organici, blaah...) tramite la lingua. Stiamo deviando un pò troppo dal nostro percorso forse sarebbe opportuno ritornarci velocemente.

Come si vede dalla Tabella 1, colonna 1 e 7 (e molto più facilmente dalla Figura 1, altrimenti perché dire ... *si vede*), siamo costituiti essenzialmente da idrogeno, ossigeno, carbonio, azoto, fosforo, calcio più tracce di altri elementi, più di mille volte meno abbondanti dell'idrogeno ma comunque indispensabili a quella forma di organizzazione molecolare che chiamano vita (... chi la sente la mamma ... se non mangiamo gli spinaci che contengono ferro !). Una prima questione che ci si deve porre è se la nostra composizione chimica (che è la stessa di tutti i mammiferi e, con lievi variazioni, degli esseri viventi) rispecchi quella dell'ambiente in cui ci si è sviluppati o se, invece, ha una valenza propria. In Figura 2 è riportata la composizione chimica media della Terra (tra poco vedremo il perché nella didascalia è riportato *sistema solare*). E'

Numero Atomico	Logaritmo del numero di atomi				Numero Atomico	Logaritmo del numero di atomi			
	Uomo	Sis. solare	Sole	SN1987A		Uomo	Sis. solare	Sole	SN1987A
1	12.00	12.00	12.00	12.00	43		0.10	0.10	
2		11.00	10.93		44		1.60	1.60	
3		3.35	0.70		45		1.20	1.20	
4		1.56	1.10		46		1.45	1.45	
5		4.19	3.00		47		1.30	0.80	
6	11.30	8.52	8.52	7.82	48		1.80	1.80	
7	10.40	8.22	7.96	6.13	49		0.93	1.40	
8	11.60	8.82	8.82	8.82	50		1.50	1.50	
9	7.70	4.60	4.60		51		1.00	1.00	
10		7.92	7.92	7.95	52		2.00	2.00	
11	8.50	6.25	6.25	5.54	53	4.60	1.40	1.40	
12	8.20	7.42	7.42	7.72	54		2.00	2.00	
13		6.39	6.39	6.60	55		1.10	1.10	
14		7.52	7.52	7.40	56		1.95	1.95	
15	9.50	5.52	5.52	5.37	57		1.60	1.60	
16	8.70	7.20	7.20	6.72	58		1.80	1.80	
17	8.40	5.60	5.60	4.10	59		1.40	1.40	
18		6.80	6.80	5.90	60		1.78	1.78	
19	8.80	4.95	4.95	3.78	61		0.00	0.00	
20	9.60	6.30	6.30	5.76	62		1.45	1.45	
21		3.22	3.22		63		0.75	0.75	
22		5.13	5.13	4.46	64		1.08	1.08	
23		4.40	4.40	1.94	65		0.30	0.30	
24		5.85	5.85	5.11	66		1.08	1.08	
25	5.00	5.40	5.40	4.46	67		0.50	0.50	
26	7.00	7.60	7.60	6.99	68		0.82	0.82	
27		5.10	5.10	3.69	69		0.30	0.30	
28		6.30	6.30	6.22	70		1.20	1.20	
29	5.80	4.50	4.50	2.61	71		0.60	0.60	
30	6.70	4.20	4.20	3.55	72		0.80	0.80	
31		3.33	2.40		73		0.30	0.30	
32		2.90	2.90		74		1.00	1.00	
33		2.30	2.30		75		0.00	0.00	
34		3.20	3.20		76		0.90	0.90	
35	6.40	2.60	2.60		77		1.80	0.80	
36		3.20	3.20		78		1.90	1.90	
37		2.40	2.40		79		0.96	0.60	
38		2.85	2.85		80		0.90	0.90	
39		1.80	1.80		81		0.20	0.20	
40		2.50	2.50		82		2.25	1.78	
41		2.00	2.00		83		0.70	0.70	
42		1.92	1.92						

Tabella 1: Abbondanza relativa degli elementi nel corpo umano, nel sistema solare, nel Sole e nel materiale espulso dalla supernova SN1987A. Per ogni 10^{12} atomi di idrogeno ($\log n_H = 12$), la tabella riporta il logaritmo del numero di atomi degli altri elementi. Per gli elementi mancanti: per il corpo umano, in letteratura, si trova solo la dizione *tracce*; per la supernova SN1987A le misure sono affette da una grossa incertezza.

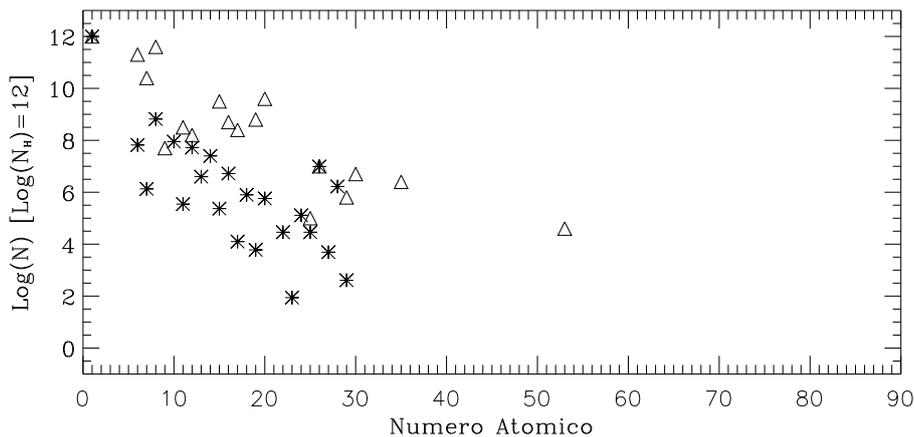


Figura 1: Abbondanza relativa del corpo umano (Δ). E' graficato il logaritmo del numero di atomi dei diversi elementi per ogni 10^{12} atomi di idrogeno. Col simbolo * è riportata anche l'abbondanza del materiale espulso dalla supernova SN1987A, esplosa nel febbraio '87.

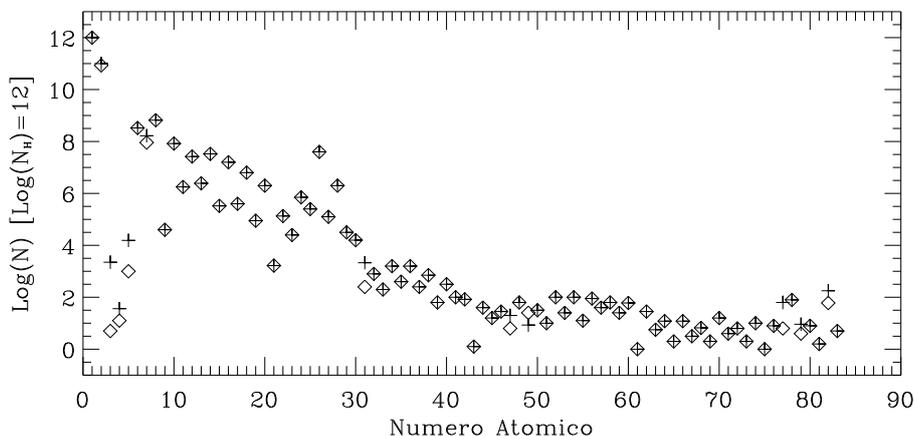


Figura 2: Abbondanza relativa degli elementi nel sistema solare (+) e sul Sole (\diamond). Le due abbondanze, eccetto che per il litio, berillio, boro e piombo, sono praticamente coincidenti.

completamente diversa dalla nostra. L'elemento più abbondante, dopo l'idrogeno, è l'elio: un atomo di elio ogni dieci di idrogeno. L'elio è praticamente assente dal nostro organismo, mentre i nostri carbonio, azoto e ossigeno sono circa mille volte più abbondanti che sulla Terra.

Certamente la Vita è un qualcosa di speciale ! L'elio e tutti i *gas nobili*, con la loro inerzia chimica (l'argon, dal greco *argos*, vuol dire proprio inerte) sono troppo nobili da essere ingredienti di corruttibili mortali. La prima consolante conclusione che possiamo trarre è che non siamo *piezz' e terr'*. La biochimica ha le sue leggi, indipendentemente dal fatto che si viva sulla Terra. C'è quindi la fondata speranza che, da qualsiasi altra parte dell'Universo si sia formata la vita, essa non sia fondamentalmente diversa da come si è sviluppata sulla Terra.

Determinare l'abbondanza degli elementi nel corpo umano o nella Terra non presenta difficoltà concettuali: se ne prende un pezzetto (per la Terra, c'è il problema di prenderne un campione *medio*) lo si porta in un laboratorio chimico e lì, usando provette e provettine, se ne fa l'analisi. Se volessimo fare lo stesso per oggetti al di fuori della Terra, questo procedimento diventerebbe impossibile. Eccetto che per le meteoriti (in questo caso, attenzione al risultato; hanno subito uno stress termico incredibile nell'attraversare l'atmosfera terrestre, perdendo molti degli elementi leggeri, ... per permetterci, come *stelle cadenti*, di sognare ed esprimere desideri nelle notti estive), per un pò di Luna e di Marte, non avremmo la possibilità di dire molto. Fortuna che la Fisica ci viene in aiuto. La luce degli oggetti porta con sè moltissime informazioni sullo stato della materia che l'ha emessa o che essa ha attraversato. Per renderle

accessibili occorre però ingegnarsi (non è forse una legge generale che *non si ottiene niente senza sforzi e sacrifici*?). Una frazione notevole delle informazioni che la luce trasporta può essere recuperata *disperdendo* la luce. Disperdere non nel senso di *rendere inefficace, frustrare, distruggere, dissipare* ma separare la radiazione nei diversi colori, cioè determinarne quello che tecnicamente è chiamato *spettro* (attenzione: ho detto spettro e non fantasma!). L'arcobaleno altro non è che lo spettro formato dalla dispersione della luce da parte di goccioline d'acqua. Negli *spettrografi* l'elemento che ha la funzione di disperdere la luce è costituito da un prisma o, molto più efficacemente, da un reticolo di diffrazione. Lo spettro della luce emessa da un gas caldo è formato da una serie di *righe*, di diversi colori, caratteristiche dell'elemento chimico di cui è composto il gas. Si è in presenza, in questo caso, di righe di emissione. Lo stesso gas, a più bassa temperatura, attraversato da luce, assorbe la radiazione nelle stesse righe (e si parla quindi di righe di assorbimento). Queste righe sono un pò le impronte digitali dell'elemento chimico. E non solo! Dall'analisi della forma e dalla precisa posizione delle righe nello spettro, è possibile determinare l'abbondanza dell'elemento chimico, la temperatura e la velocità dell'oggetto che emette luce.

Nota il trucco, possiamo divertirci a determinare la composizione chimica di oggetti celesti (gassosi), senza doverci scomodare a recarci sul posto! Basta avere un grosso imbuto per la luce, tecnicamente è chiamato *telescopio* (per disperdere la luce occorre raccorglierne molta), uno spettrografo e tanta Fisica. Lo possiamo fare, per esempio, per alcuni oggetti del sistema solare, le *comete*, le meteoriti mentre attraversano l'atmosfera terrestre etc. . Il risultato è che la composizione chimica degli oggetti del sistema solare è identica a quella della Terra.

Lo stesso si può fare per il Sole e le altre stelle (le stelle sono delle sfere gassose, anzi, tranne alcune eccezioni, il loro materiale può essere considerato come il miglior esempio di *gas perfetto*). La composizione chimica del Sole è quasi coincidente con quella della Terra. Le differenze nel litio, berillio, boro e piombo sono perfettamente spiegate dalle diverse condizioni fisiche in cui è stato posto il materiale. Questa coincidenza di composizione chimica tra Sole e sistema solare è certamente la miglior riprova che Sole e sistema solare derivano da un unico oggetto.

Nella nostra galassia (per chi vuole completare il proprio indirizzo, oltre alla via, numero civico, città, nazione, pianeta e sistema solare, deve aggiungerci *Via Lattea*) ci sono molte stelle con la stessa composizione chimica del Sole. Sono principalmente concentrate sul disco galattico, nei bracci a spirale (la forma della nostra galassia rassomiglia ad un uovo ad *occhio di bue*, l'albumine costituisce il disco galattico). Intorno alla galassia, in quello che è chiamato *alone*, vi sono isole di stelle dette *ammassi globulari*. La composizione chimica delle stelle degli ammassi globulari differisce notevolmente da quella del nostro Sole. Sono molto più ricche di idrogeno (un atomo di elio ogni 30-35 atomi di idrogeno) e 20-30 volte più povere di *metalli* (in astrofisica vengono detti metalli tutti gli elementi più pesanti dell'elio, ... promettetelo: non ditelo ai chimici).

Siamo ora in grado di porre due domande fondamentali :

- a) perché alcune stelle hanno composizione chimica diversa dal Sole (e dal sistema solare) ?
- b) esiste un'evoluzione della composizione chimica o questa differenza è legata a disomogeneità primordiali ?

La questione b) può avere dei risvolti interessanti. Se evoluzione c'è stata, certamente è stata nella direzione da elementi con numero atomico basso a numero atomico alto. Questa affermazione prendiamola, per ora, come ipotesi di lavoro abbastanza plausibile (sistemi complessi li si possono generalmente ritenere aggregati di elementi più semplici). Nel caso di evoluzione degli elementi, sarebbe interessante scoprire in quali ambienti sono stati *cucinati* alcuni degli atomi che costituiscono attualmente il nostro organismo. La questione ha lo stesso fascino della riscoperta del proprio albero genealogico.

L'antro dell'alchimista. Un nucleo di elio è costituito da 2 protoni e 2 neutroni. Il linea di principio lo si potrebbe pensare come l'unione (successiva) di 4 nuclei di idrogeno (un nucleo di idrogeno è costituito da un solo protone; non esistono in natura neutroni liberi perché decadono, con vita media di circa 15 minuti, in protone, elettrone e neutrino). Dei 4 protoni, 2 decadono in neutroni emettendo 2 positroni.

Certo, la forza che tiene unite le particelle nel nucleo è molto grande (si chiama infatti *interazione forte*), ma ha un raggio d'azione molto piccolo. Quindi, partendo da 2 protoni, ovvero da 2 nuclei di idrogeno, bisogna avvicinarli abbastanza affinché entrino in gioco le forze (attrattive) nucleari. Ma i 2 protoni hanno la stessa carica elettrica non è, quindi, facile

farli avvicinare perché esiste una forza elettrica di repulsione (repulsione coulombiana) che è proporzionale al prodotto delle 2 cariche ed inversamente proporzionale al quadrato della distanza delle 2 cariche. Per *comprimere* i 2 protoni fino alla distanza di azione delle forze nucleari occorrerebbe *solo* una forza di circa 40 grammi-peso. Sembra poco, ma se si cercasse di comprimere i nuclei contenuti in 1 grammo di idrogeno, occorrerebbe una forza di 1.2×10^{22} kg-peso! (per fortuna! ed è questo il motivo per cui la bomba H è stata messa a punto solo negli anni '50).

Un altro modo di raggiungere lo stesso effetto, avvicinare cioè i 2 protoni fino alla distanza in cui intervengono le forze nucleari, è quello di *sparare* un protone contro l'altro (detto in modo corretto: fornire ai protoni energia cinetica superiore alla barriera di potenziale coulombiano). In questo caso bisogna sparare il primo protone con una velocità di circa 14'000 km/s. Ed è quanto si fa correntemente nei laboratori di fisica nucleare. La *pistola*, in questo caso, è l'acceleratore di particelle. Ma indice di velocità in un gas di particelle è il parametro che chiamiamo *temperatura*. I 14'000 km/s richiesti per avvicinare i 2 nuclei di idrogeno, corrispondono ad una temperatura di 10 miliardi di gradi. In realtà, per un fenomeno studiato nella *meccanica quantistica*, noto come *effetto tunnel*, le reazioni di *fusione* protone-protone iniziano già a temperature di circa 3 milioni di gradi. Naturalmente se si vuole unire insieme 2 nuclei di elio per formare un nucleo di berillio (che decade immediatamente in 2 nuclei di elio) occorrono temperature molto più alte perché la forza elettrica di repulsione è molto più grande (abbiamo detto che è proporzionale al prodotto delle 2 cariche). Più grossi sono quindi i nuclei da *fondere* insieme e più alta è la temperatura richiesta.

Abbiamo individuato il sistema per produrre elementi pesanti a partire da elementi più leggeri (il fenomeno è detto *nucleosintesi*). Andiamo ora a cercare dove e quando si sono formati gli atomi *pesanti* presenti nel nostro corpo.

La risposta verrebbe immediata a chi abbia visto qualche puntata di *Quark* in TV: ... ma nel *BIG BANG*!

Anche se dimostra prontezza di riflessi e passione per questioni scientifiche, la risposta è completamente errata. Nelle fasi iniziali del Big Bang la temperatura è così elevata che perfino protoni e neutroni, che sono particelle *composte*, non possono esistere. E' come mettere delle molecole in un ambiente ad alta temperatura; gli urti tra particelle avvengono ad energia più alta della energia del legame molecolare per cui il composto si dissocia. Nelle prime fasi del Big Bang sarebbero potuto coesistere solo le *vere* particelle elementari (quark, elettroni ed altre particelle esotiche -per intenderci ... quelle del premio Nobel di Rubbia) e le relative antiparticelle. Per fortuna c'era un piccolo eccesso di particelle rispetto alle antiparticelle (una ogni milione di coppie particella-antiparticella). Nelle successive fasi di espansione e, quindi, di riduzione della temperatura le coppie particella-antiparticella annichirono e i quark residui diedero luogo ai protoni e neutroni che poi si combinarono tra loro. Ma la temperatura si abbassò molto velocemente per cui si formarono solo un pò di elio (oltre all'idrogeno, cioè i protoni, naturalmente). In complesso, dal Big Bang, emersero un atomo di elio per ogni 36 atomi di idrogeno (oh ... i numeri ricordano un pò la composizione chimica delle stelle negli ammassi globulari. Che siano le stelle nate dalla materia primordiale?).

Accertato che il calcio delle nostre ossa, il ferro che lega l'ossigeno nella nostra emoglobina, lo stesso ossigeno che respiriamo non derivano dal Big Bang, rimettiamoci in cerca della fucina, della fabbrica degli elementi pesanti.

Al centro del nostro Sole ci sono temperature dell'ordine di 15 milioni di gradi. Queste temperature sono più che sufficienti a *bruciare* efficacemente idrogeno in elio. In generale, le regioni centrali delle stelle sono i posti più caldi dell'Universo e, quindi, gli unici posti in cui può avvenire la nucleosintesi. Sembra che ora un punto fermo sia stato raggiunto: il centro delle stelle è stato il ventre in cui sono stati concepiti gli elementi pesanti del nostro organismo. Noi siamo stati lì! Per riscoprire le nostre origini bisogna ripercorrere un storia delle stelle. Ed ancora le sorprese non mancheranno!

Vita, morte e resurrezione delle stelle. Negli spazi interstellari vi sono regioni particolarmente ricche di materiale dette *nubi*. In figura 3 (in alto a sinistra) è riprodotta la Nube di Orione (per chi ha confidenza con il cielo notturno, è facile individuare la *cintura* di Orione, proprio sotto la cintura ci sono 3 stelle, la *spada*; la *stella* centrale della spada è la Nube di Orione). Le nubi sono solo relativamente *ricche* di materiale. Sono costituite da 100-1000 particelle per cm^3 , per avere il numero di particelle presenti in 1 cm^3 della nostra atmosfera

occorre mettere insieme le particelle presenti in una parte della nube che abbia il volume di tutta la Terra! Queste nubi possono collassare, ovvero contrarsi, per diversi meccanismi (per cause interne, se la nube è molto grossa, o per cause esterne tipo onde d'urto che si propagano nei bracci a spirale

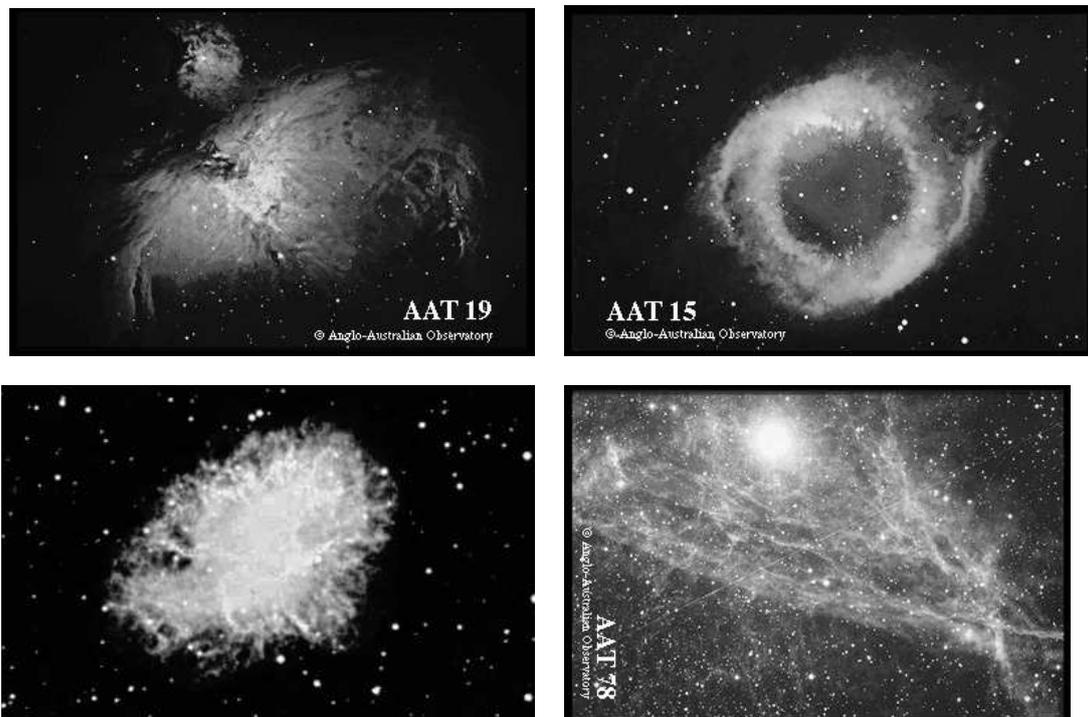


Figura 3: In alto a sinistra: la Nebulosa di Orione posta a circa 1500 anni-luce da noi. In alto a destra: la nebulosa planetaria dell'Elica. In basso a sinistra: la Nebulosa del Granchio, ovvero i resti in espansione di una supernova esplosa nel 1054 nella costellazione del Toro. In basso a destra: resti, molto diffusi nello spazio, di una supernova di 12000 anni fa esplosa nella costellazione della Vela a 1500 anni luce dalla terra.

della galassia o generate da esplosioni di stelle). Contraendosi la nube si riscalda; è lo stesso fenomeno che si può riscontrare gonfiando lo pneumatico di una bicicletta: comprimiamo l'aria nella pompa, dopo un paio di colpi la pompa diventa calda.

La nube che si stà contraendo è chiamata *protostella*. Contraendosi la protostella continua a riscaldarsi, raggiunge temperature elevate ed il materiale si ionizza completamente. Il destino della protostella è completamente determinato dalla quantità di materia di cui è costituita, cioè dalla sua massa.

Se la sua massa è inferiore a $0.08 M_{\odot}$, ove con M_{\odot} si è indicato la massa del Sole che è circa 2×10^{30} kg (è uso corrente esprimere le masse, in astrofisica, in unità di masse solari), la protostella non riuscirà mai a raggiungere nel suo centro la temperatura di 3 milioni di gradi necessaria all'innesco del primo combustibile nucleare, l'idrogeno. Le sue particelle più leggere, gli elettroni, fortemente compresse, presenteranno un comportamento molto diverso da quello di *gas perfetto*; mostrano degli effetti quantistici che derivano direttamente dal *principio di esclusione* di Pauli (quello studiato in Chimica ... non possono esistere, all'interno di un atomo, 2 elettroni con gli stessi numeri quantici) e gli elettroni vengono detti *degeneri*. La pressione dovuta agli elettroni degeneri è indipendente dalla temperatura e dipende solo (e fortemente) dalla densità. La pressione di degenerazione elettronica fermerà la contrazione in protostelle di piccola massa e, quindi, l'aumento di temperatura. Esse non raggiungeranno mai la fase di combustione dell'idrogeno (solo da allora in poi si parla di *stella*) e resteranno in equilibrio per sempre come ... stelle mancate. Giove, che ha una massa di $0.001 M_{\odot}$, è in questo stato.

Per masse superiori a $0.08 M_{\odot}$, la temperatura centrale supera il valore di 3 milioni di gradi necessari all'innesco dell'idrogeno e ... nasce una stella. La produzione di energia nucleare blocca, per tutto il suo perdurare, la contrazione. Proprio all'inizio della combustione, la struttura della stella cambia completamente per adattarsi alle nuove condizioni e si manifestano,

per qualche tempo, fenomeni di variabilità intrinseca (stelle tipo *T-Tauri* e stelle *simbiotiche*). Il *reattore nucleare* stella è estremamente ben controllato. Se viene prodotta, per qualsiasi ragione, più energia di quanto possa essere portata fuori della stella ed irraggiata nello spazio, la temperatura centrale cresce, la pressione cresce (è un gas perfetto), la parte centrale si espande riducendo la temperatura e, quindi, la produzione di energia. La fase di combustione dell'idrogeno è la fase più lunga nella vita di una stella. Per il nostro Sole è di 9 miliardi di anni (... ma ne sono già trascorsi 4.5 miliardi di anni); la durata è inversamente proporzionale al cubo della massa, per stelle di $10 M_{\odot}$ dura solo 9 milioni di anni mentre, per stelle di $0.1 M_{\odot}$ è di 9'000 miliardi di anni!

Se la massa della stella è compresa tra 0.08 e $0.26 M_{\odot}$, esaurito l'idrogeno (è stato trasformato quasi tutto in elio, tranne una buccia esterna che ha una temperatura troppo bassa per bruciare idrogeno), cessa la produzione di energia nucleare e la stella ricomincia a contrarsi. Ma per queste stelle, il fenomeno di degenerazione elettronica interverrà a bloccare la contrazione prima che la temperatura centrale raggiunga i 100 milioni di gradi necessari all'innescò dell'elio. La stella resterà per sempre in equilibrio in questo stato, raffreddandosi molto lentamente. Le stelle in questa fase, cioè con elettroni degeneri, sono chiamate *nane bianche*, nane dalle loro dimensioni (raggio dell'ordine dei 10'000 chilometri, contro i 700'000 del Sole) e bianche dal colore della loro luce (hanno una temperatura superficiale di circa 15'000 gradi). L'elio formatosi a spese dell'idrogeno all'interno della stella resterà lì per sempre. Finora nessuna stella di questa classe di masse ha raggiunto la fase di nana bianca, in quanto anche le stelle più massicce (quelle di $0.26 M_{\odot}$) che evolvono più rapidamente, impiegano 500 miliardi di anni che è all'incirca 35 volte l'età attuale dell'Universo!

Stelle con massa superiore a $0.26 M_{\odot}$ ed inferiore a $1.5 M_{\odot}$ bruciano l'idrogeno in elio, cessa la produzione di energia, iniziano a contrarsi e raggiungono, nel centro, la temperatura di innescò dell'elio ma con la regione centrale parzialmente degenera. Il meccanismo di stabilizzazione del *reattore*, che abbiamo descritto prima, non funziona appieno in queste condizioni in quanto la pressione è poco sensibile alla temperatura (elettroni parzialmente degeneri). Viene prodotta energia che aumenta la temperatura che incrementa la produzione di energia e così via, fino a che si raggiungono temperature tali da rimuovere la degenerazione elettronica (poi il gas si comporta da gas perfetto, col sistema di controllo della produzione di energia). Si ha quindi un innescò esplosivo della combustione dell'elio (tecnicamente si chiama *helium flash*). Come risultato dell'innescò esplosivo, la stella espelle parte del suo involucro esterno dando luogo a quella che viene detta *nebulosa planetaria*, ne è riportato un esempio in Figura 3, in alto a destra. Il nome è fuorviante, non ha niente a che fare con la formazione dei pianeti (si formano dalla stessa nube che forma la stella, vedere la sezione *Homo sapiens e dintorni*), ma sono state *battezzate* più di 100 anni fa. E' costituita essenzialmente da idrogeno (materiale non *digerito* dalla stella). Esaurito l'elio nella parte centrale, cessa la produzione di energia e la stella ricomincia a contrarsi. La degenerazione elettronica, poi, blocca la contrazione prima che si raggiunga la temperatura di un miliardo di gradi necessaria alla combustione del carbonio; si ha così la formazione di una nana bianca. Il carbonio, che si è formato dalla combustione dell'elio, resterà per sempre intrappolato nel cuore della nana bianca e ... non contribuirà alla nostra biochimica.

Il comportamento di stelle con massa fino a quattro masse solari non è molto differente. Riusciranno a trasformare parte del carbonio in ossigeno prima di diventare nane bianche.

Una sorte diversa tocca a stelle dotate di massa superiore a $4 M_{\odot}$; bruceranno anche parte del ossigeno in silicio e le temperature centrali saranno così elevate che gli elettroni possiederanno energia sufficiente a reagire con i protoni per formare neutroni (e neutrini, che scappano velocemente via). Ora tirate un grosso respiro per prepararvi a leggere il seguito in un secondo (è l'intervallo di tempo in cui accadono tutti gli avvenimenti che seguono). La pressione è proporzionale al numero di particelle; se da due particelle (elettrone e protone) se ne formano una, la pressione (che finora sorregge bene gli strati sovrastanti della stella) si dimezza improvvisamente, le parti esterne crollano sul nucleo della stella: si ha il *collasso*. Si raggiungono quindi densità elevatissime (valori di 1 miliardo di chilogrammi per cm^3), tutto il nucleo è un ammasso di neutroni che rapidamente diventano degeneri e contrastano efficacemente il collasso. Le parti esterne della stelle ... non hanno ancora notato che il nucleo è diventato degenera, e *rimbalzano* sul nucleo. Si forma un'onda d'urto di altissima energia che spazza via il resto della stella e negli strati investiti dall'onda d'urto si formano gli elementi pesanti che vengono poi espulsi a velocità di 1'000 – 10'000 km/s.

Il nucleo residuo, se ha massa dell'ordine della massa del Sole, darà luogo ad una *stella a neutroni* (in particolare se è dotato di campo magnetico sarà una *pulsar*); se la sua massa è più alta, si contrarrà all'infinito dando luogo ad un *buco nero*.

Il materiale espulso, ricco di elementi pesanti, andrà a cambiare la composizione chimica delle nubi interstellari da cui nasceranno poi altre stelle (di seconda generazione, come il nostro Sole) più povere di idrogeno e più abbondanti di elio e metalli. I sistemi planetari di queste stelle saranno a loro volta ricchi degli elementi pesanti necessari allo sviluppo della vita. In figura 1 è riportata (con un *) la composizione del materiale espulso da una supernova esplosa nel 1987 nella Grande Nube di Magellano (una piccola galassia satellite della Via Lattea, le supernove vengono indicate con SN seguito dall'anno della scoperta e da una lettera sequenziale dell'alfabeto, questa è SN1987A, cioè la prima osservata nel 1987).

Per far, grosso modo, sovrapporre in Figura 1 la composizione del corpo umano con quella di SN1987A occorrerebbe spostare quest'ultima verticalmente di +2.7 (siamo i resti, 500 volte concentrati, di una supernova?). La Figura 3 (in basso a sinistra) mostra l'immagine dei residui in espansione di una supernova esplosa nel 1054 a 3300 anni-luce da noi (Nebulosa del Granchio). Ancora più diffusi nello spazio interstellare sono i residui di una supernova esplosa nella costellazione della Vela 12000 anni fa e distant1 1500 anni-luce (Figura 3, in basso a destra).

Conclusioni. Spero non abbiate sciupato la pigra e soleggiata domenica ... oh dimenticavo, per non sprecarla del tutto, come in ogni favola che si rispetti, bisogna ricercare la *morale* di questa storia: al semaforo è assolutamente inutile coprire di irripetibili impropri l'automobilista indisciplinato che passa col rosso; non lo tangono; lui è perfettamente consapevole di essere *figlio di una supernova* esplosa in questa periferia della Via Lattea 5 miliardi di anni fa!