

# Gli ingredienti dell'Universo

di Francesco Battistelli (2009)

## 1. dai filosofi greci alle scoperte del seicento

Le cose si presentano in natura in differenti forme. La riflessione scientifica è nata nell'antica Grecia: i primi filosofi, probabilmente osservando le trasformazioni di stato tra solidi, liquidi e gas, iniziarono a ragionare sui fenomeni naturali, individuando negli oggetti del mondo naturale due coppie di qualità: CALDO-FREDDO e UMIDO-SECCO.



La filosofia greca inizialmente ricercò del principio primitivo ed universale di tutte le cose che presentavano in natura differenti forme.

"La maggior parte di coloro che primi filosofarono pensarono che principi di tutte le cose fossero solo quelli materiali. Infatti essi affermano che ciò di cui tutti gli esseri sono costituiti e ciò da cui derivano originariamente e in cui si risolvono da ultimo, è elemento ed è principio degli esseri, in quanto è una realtà che permane identica pur nel trasmutarsi delle sue affezioni. E, per questa ragione, essi credono che nulla si generi e che nulla si distrugga, dal momento che una tale realtà si conserva sempre. (...) Tuttavia, questi filosofi non sono tutti d'accordo circa il numero e la specie di un tale principio. Talete, iniziatore di questo tipo di filosofia, dice che quel principio è l'acqua (per questo afferma anche che la Terra galleggia sull'acqua), desumendo indubbiamente questa sua convinzione dalla constatazione che il nutrimento di tutte le cose è umido, e che perfino il caldo si genera dall'umido e vive nell'umido. Ora, ciò da cui tutte le cose si generano è, appunto, il principio di tutto. Egli desunse dunque questa convinzione da questo fatto e dal fatto che i semi di tutte le cose hanno una natura umida e l'acqua è il principio della natura delle cose umide". (*Aristotele, Metafisica 983 b*)

I filosofi della scuola di Mileto (VI secolo a.C.) consideravano la natura composta da quattro elementi: per **Talete** la sostanza fondamentale alla base dei fenomeni naturali era l'acqua che, tramite processi di rarefazione e condensazione, si trasforma in aria (vapore), fuoco (gas rarefatto) e terra (residuo solido); per **Anassimandro** il principio unitario era qualcosa di non conoscibile e indeterminato (*apeiron*) e per **Anassimene** il principio era l'aria, che poteva trasformarsi in fuoco, aria e terra. **Eraclito** (535-475 a.C.) sostituì l'indefinito *apeiron* con

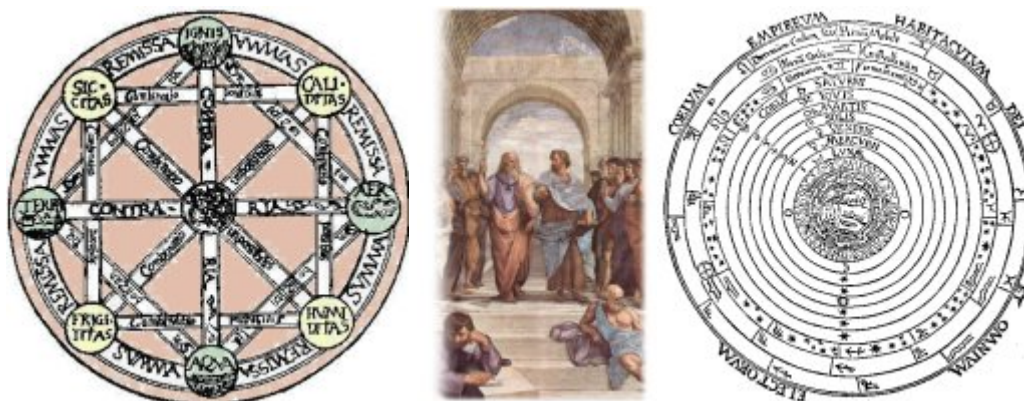
il *logos* (una legge razionale), ponendo il fuoco come elemento primordiale dal quale si generano gli altri stati elementari.



A Mileto si formò anche una linea di pensiero diversa: Leucippo e **Democrito** (460-360 a.C.) consideravano la natura composta di entità invisibili e indivisibili (*atomî*) che si muovevano nel vuoto. Dal movimento e dalla combinazione degli atomi si formavano tutte le cose che esistono con le loro diverse proprietà.

### I quattro elementi naturali e la quintessenza celeste

**Empedocle** di Agrigento (492-432 a.C.) riassumendo le concezioni dei filosofi precedenti formulò la dottrina del quattro elementi (fuoco, aria, acqua, terra) chiamati *radici*, necessari e sufficienti per spiegare la pluralità della materia. **Pitagora** (ca. 570-496 a.C.) studiò il suono e vedendo che le onde musicali potevano esprimersi come rapporti numerici, sviluppò la teoria delle sfere armoniche e considerò il cielo perfetto e incorruttibile. **Platone** (427-347 a.C.) riprese le idee pitagoriche attuando una dicotomia tra il mondo sub-lunare imperfetto e il cielo perfetto, formato da un quinto elemento detto *etere*.



Rappresentazione delle categorie e delle trasformazioni del mondo naturale secondo Aristotele (G.W.Leibniz in *Dissertatio de arte combinatoria*, 1666)

Le teorie di Empedocle e di Platone furono riprese da **Aristotele** (384-322 a.C.): gli oggetti naturali corruttibili erano formati da quattro elementi (Terra, Acqua, Aria e Fuoco, in ordine di peso) e ogni elemento aveva un proprio luogo naturale al quale tendeva in base al suo peso, definito come tendenza ad andare verso il centro della terra (e centro dell'universo). I passaggi da un elemento all'altro erano dati per acquisto o perdita di una delle quattro qualità caldo-freddo, secco-umido. Come il suo maestro Platone, Aristotele considerava i corpi celesti formati da un quinto elemento (*quintessenza*) e soggetti a moti circolari perfetti ed eterni.

### Si riavvicinano il cielo e la terra

Quasi duemila anni dopo le osservazioni e le misure di **Tycho** della stella nova del 1572 e della cometa del 1577 rivelarono la natura celeste di fenomeni considerati dalla tradizione aristotelica come fenomeni atmosferici.



Tycho Brahe (1546-1601) al quadrante murale di Uraniborg  
immagine tratta da un atlante del 1663, British Museum

Nel Seicento le osservazioni di **Galileo** e la legge di gravitazione universale di **Newton** diedero il colpo definitivo alla dicotomia tra cielo e terra: da un lato le macchie solari, le valli e i crateri lunari visti al cannocchiale mostravano che il Sole e la Luna non erano mondi perfetti e incorruttibili, dall'altro nel cielo e nella Terra valevano le stesse leggi.



Isaac Newton (1642-1727)  
ritratto di Sir Godfrey Kneller  
(Farleigh House, Hampshire)

Galileo Galilei (1564-1642),  
ritratto di Jacob Sustermans  
(Uffizi, Firenze)

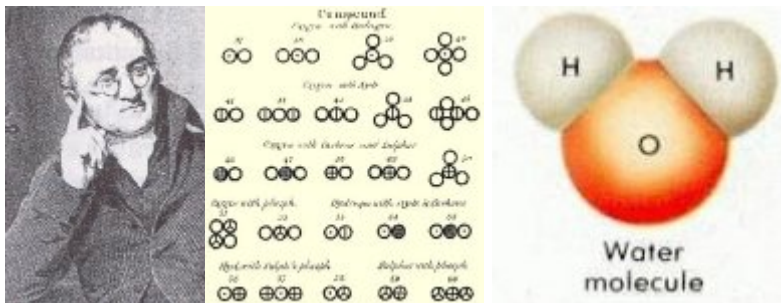
## 2. la nascita della chimica

Grazie allo sviluppo della tecnica dal XVII secolo ci si rese conto che la materia è composta da molti elementi semplici e gli scienziati capirono che ci voleva una teoria diversa dal classico modello greco dei quattro elementi.



### Dalton e la teoria atomica

Lo scienziato inglese John Dalton, studiando le miscele gassose, enunciò nel 1801 la "legge delle pressioni parziali" e pose le basi per la moderna teoria chimica atomica. Affermò che gli atomi di un elemento sono identici e che atomi di elementi diversi hanno pesi atomici diversi, che gli atomi sono indivisibili e che possono combinarsi in rapporti fissi (per esempio qualunque quantità di acqua è formata da circa 8 parti in peso di ossigeno e 1 parte di idrogeno). Dalton compilò nel 1803 una tabella dei pesi atomici e per indicare gli atomi conosciuti utilizzò simboli nuovi al posto di quelli alchemici.



John Dalton (1766-1844) e una sua Tavola di molecole poliatomiche

Dopo di lui i chimici dell'Ottocento cercarono di classificare gli elementi che venivano via via scoperti, e le classificazioni principali venivano fatte in due modi distinti:

- in ordine di peso atomico, dall'idrogeno agli elementi più pesanti
- in base alle somiglianze nelle proprietà chimiche e fisiche riscontrate negli elementi: Döbereiner raggruppò gli elementi in famiglie dette triadi (per esempio cloro, bromo e iodio), Chancourtois e Newlands scoprirono che fino al calcio le proprietà comuni si ripetevano ogni otto elementi.

### Mendeleev e la tabella periodica

Il chimico russo Dmitri Mendeleev unificò queste due classificazioni e nel 1869 costruì una tabella (detta tavola periodica) in cui gli elementi disposti per massa atomica evidenziavano la periodicità delle loro proprietà chimiche e fisiche. Proprio per rispettare la periodicità e per avere gruppi di elementi con le stesse proprietà, Mendeleev modificò l'ordine definito dalla massa (per esempio mise il Cobalto più pesante prima del Nichel) e lasciò vuoti alcuni posti, sicuro che fossero occupati da elementi ancora da scoprire.

I							II							III							IV							V							VI							VII							VIII																					
H	Li	Na	K	Rb	Cs	Fr	Be	Mg	Ca	Sr	Ba	Ra	B	Al	Ga	In	Tl	C	Si	Ge	Sn	Pb	N	P	As	Sb	Bi	O	S	Se	Te	Po	F	Cl	Br	I	At	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
1.01	6.94	23.0	39.1	85.5	133	197	9.01	24.3	40.1	87.6	137	201	10.8	27.0	70.0	119	204	12.0	28.1	72.6	118.7	207	14.0	31.0	75.0	120	209	16.0	32.1	78.96	127.6	210	19.0	35.5	79.9	126.9	210	55.8	58.9	58.7	63.5	65.4	75.0	78.96	81.0	85.4	91.2	95.9	101	103	106	133	137	137	150	152	157	162	167	173	175	184	197	201	209	210	223	238		

La classificazione di Mendeleev venne accettata da pochi scienziati. Fu proprio la scoperta tra il 1875 e il 1886 di tre elementi mancanti (gallio, scandio e germanio) che avevano le proprietà predette dal chimico russo a fare risaltare l'importanza della tavola periodica. All'inizio del Novecento tutti gli elementi conosciuti erano classificati nella Tabella Periodica degli elementi, anche se non si sapeva ancora il motivo che spiegava perché un elemento avesse una determinata massa e perché elementi diversi avessero proprietà comuni.

## 3. gli ingredienti della Terra

Vediamo quali sono gli elementi chimici che compongono il mondo in cui viviamo, iniziando dalla superficie terrestre divisa per elemento fondamentale (aria, acqua, terra)



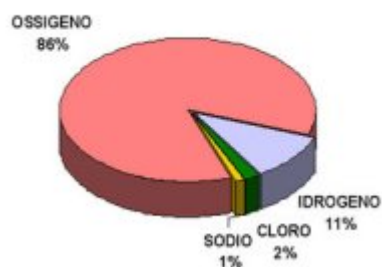
Il nostro pianeta visto da satellite. Da notare la prevalenza delle acque e lo spessore esiguo dell'atmosfera

- L'**atmosfera** è un involucro di gas che circonda la Terra, ed è costituito principalmente di azoto e di ossigeno molecolari. Tra gli altri componenti gassosi (circa 1%) sono importanti l'anidride carbonica e il vapore acqueo.
- l'**idrosfera** è l'insieme delle acque che ricoprono la superficie. L'acqua è costituita da atomi di idrogeno e ossigeno e si trovano disciolti sali solubili sotto forma di ioni (principalmente sodio, magnesio, cloruri e solfati).
- la **crosta** terrestre è lo strato solido superficiale (da 20 a 60 km di spessore), ed è composta da rocce e minerali costituiti principalmente da silicati e ossidi metallici.

**COMPOSIZIONE DELL'ATMOSFERA**  
(percentuale in peso)



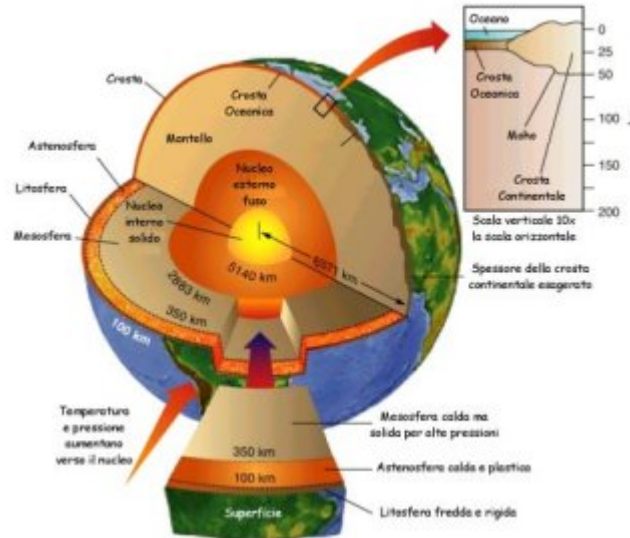
**COMPOSIZIONE DELL'IDROSFERA**  
(percentuale in peso)



**COMPOSIZIONE DELLA CROSTA TERRESTRE**  
(percentuale in peso)

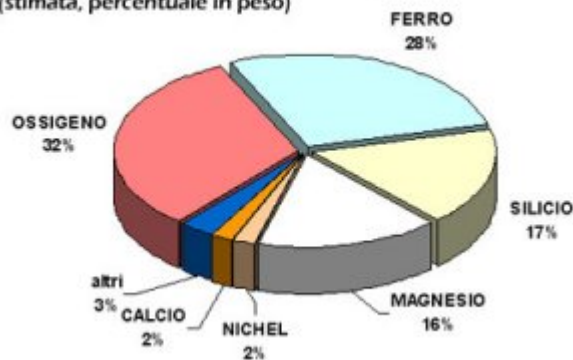


La Terra è formata da tre gusci: infatti al di sotto della crosta superficiale troviamo il mantello e il nucleo, la cui composizione viene dedotta in modo indiretto grazie ad osservazioni chimico-fisiche. Il **nucleo** è costituito principalmente da una lega di ferro e nichel, con un contributo di altri elementi più leggeri. Anche il **mantello**, come la crosta, è fatto essenzialmente di silicati, basati su silicio, magnesio e ferro, e costituiti da rocce formate da olivine e pirosseni.



Nel complesso per la composizione chimica della Terra sono importanti 11 elementi chimici (che costituiscono il 99.5% del peso), dei quali quattro sono gli elementi principali (ossigeno, ferro, silicio e magnesio). Come vedremo in seguito, rispetto alla nebulosa dalla quale si è formato il Sistema Solare, in seguito alle differenziazioni chimiche nei processi di aggregazione che hanno portato alla formazione del nostro pianeta mancano gli elementi più leggeri e i gas nobili. Altro componente marginale è il carbonio, che pur risultando un elemento fondamentale della vita è presente disciolto in acqua e nelle rocce in minima percentuale rispetto agli altri elementi chimici.

**COMPOSIZIONE DELLA TERRA**  
(stimata, percentuale in peso)



## 4. gli ingredienti degli astri

In astronomia è impossibile fare esperimenti a distanza sugli astri; l'unica cosa che possiamo fare è osservarne la posizione nello spazio e misurarne la radiazione elettromagnetica emessa.



francobollo francese per il centenario della morte di Auguste Comte (1798-1857)

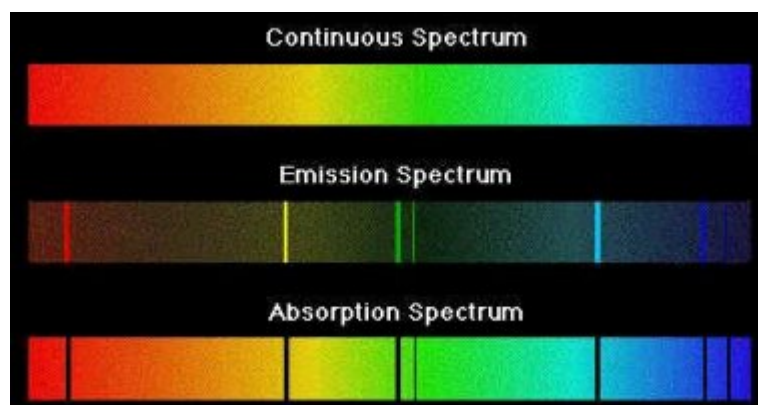
Se nel 1835 Auguste Comte, il filosofo padre della sociologia, nel volume dei suoi "Corsi di filosofia positiva" dedicato alla filosofia dell'astronomia e della fisica, scriveva "riguardo agli astri (...) non sapremo mai studiare in alcun modo la loro composizione chimica, o la loro struttura mineralogica, e, a maggior ragione, la natura dei corpi organizzati che vivono sulla loro superficie", era da poco nata la branca della chimica detta **spettroscopia** che avrebbe permesso di conoscere la composizione chimica delle stelle. Infatti nel 1802 il chimico inglese Wollaston si era accorto per primo della presenza di sette righe scure nello spettro del Sole e dei pianeti, e l'ottico tedesco Fraunhofer nel 1814 aveva misurato nella luce solare diffusa oltre 500 righe scure (le più importanti vengono indicate con lettere da A a G).

Gli scienziati scoprirono ben presto che ogni sostanza produce uno spettro con righe caratteristiche, e i chimici furono i primi a beneficiare di un metodo che dava la possibilità di indagare le proprietà dei componenti elementari della materia, anche se non si sapeva che cosa significassero quelle righe.

## Spettro continuo, ad emissione e di assorbimento

Nel 1859 il fisico tedesco Kirchhoff enunciò tre leggi empiriche sui tre tipi di spettri allora conosciuti:

1. un corpo denso (solido, liquido o gas ad alta pressione) e incandescente genera uno **spettro continuo**.
2. un gas rarefatto (quindi a bassa pressione) e incandescente genera uno **spettro ad emissione**, ovvero un debolissimo spettro continuo con specifiche righe più brillanti del fondo.
3. una sorgente che emette uno spettro continuo e un gas freddo posto davanti ad essa generano uno **spettro di assorbimento**, ovvero uno spettro continuo con specifiche righe scure, che corrispondono alle righe brillanti dello stesso gas incandescente.



fonte: [M. Rieke, Fundamentals of Astronomy](#)

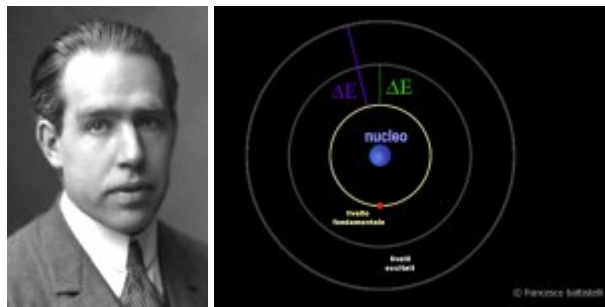
Ogni elemento produce una caratteristica impronta di righe, corrispondenti alla lunghezza d'onda che la luce emette:

- quindi uno **spettro ad emissione** dà informazioni sulla sorgente
- uno **spettro ad assorbimento** dà informazioni sulla materia tra sorgente e osservatore. Questa materia assorbe o diffonde la radiazione emessa dalla sorgente, quindi possiamo vedere o il gas che c'è tra noi e la sorgente oppure i gas che ne compongono l'atmosfera.
- uno **spettro ad emissione** dà informazioni sulla materia eccitata da una sorgente che non è prospetticamente allineata con l'osservatore.



## Il modello atomico di Bohr

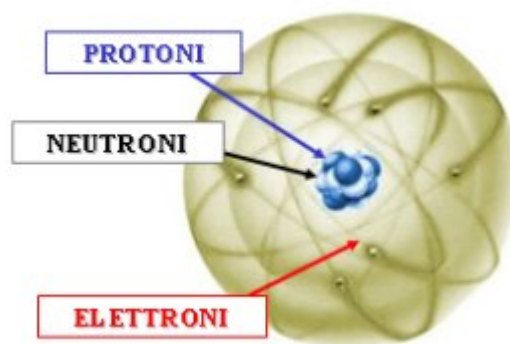
Dal 1913 il fisico danese Bohr elaborò un modello per l'atomo di idrogeno che produca lo spettro e le lunghezze d'onda osservate con l'assorbimento e l'irradiazione della luce. Maxwell aveva scoperto che elettricità e magnetismo sono due facce della stessa interazione e che la luce è una propagazione alla velocità costante = 300000 km/s di campi elettrici e magnetici oscillanti. Il colore dipende dalla lunghezza d'onda e (dato che la velocità della luce è costante) dalla frequenza, inoltre la luce è solo una piccola parte delle radiazioni elettromagnetiche. Nel modello atomico la luce emessa e assorbita è energia che proviene dalla riorganizzazione degli elettroni esterni, per i quali solo alcune orbite sono consentite. Infatti per la meccanica classica un elettrone in orbita emette radiazione e quindi perdendo energia deve cadere nel nucleo, ma applicando la meccanica quantistica Bohr si accorse che erano permesse solo alcune orbite stazionarie corrispondenti a una determinata energia nelle quali l'elettrone non irradia energia. Ogni elettrone tende a occupare l'orbita libera più in basso (stato fondamentale), per saltare in un'orbita superiore deve assorbire energia che viene riemessa se l'elettrone torna in un'orbita inferiore.



Niels Bohr (1885-1962), [www.nobelprize.org](http://www.nobelprize.org)

## Atomi ed elementi chimici

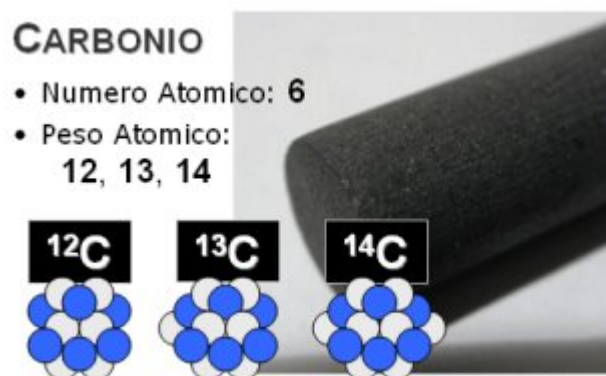
Dopo la scoperta del neutrone avvenuta nel 1932 si capì che il nucleo positivo di ogni atomo presente in natura appare costituito da due tipi di particelle, **protoni** a carica positiva e **neutroni** senza carica elettrica, tenute insieme da una forza detta interazione nucleare forte. Gli **elettroni** negativi di un atomo occupano una nuvola diffusa con variazioni nei livelli di energia, e se l'atomo è neutro (in caso contrario è detto ione) sono in numero uguale al numero dei protoni.



L'osservazione che tutta la materia conosciuta è solo una differente combinazione degli stessi tre oggetti (protoni, neutroni ed elettroni) ha quindi semplificato la struttura della materia, riducendo il numero dei componenti fondamentali da 90 elementi chimici a 3 particelle. Quello che differenzia gli elementi chimici non è altro il numero di protoni presenti nel nucleo. Infatti i protoni ed i neutroni pesano circa 2000 volte di più degli elettroni, quindi il loro numero determina la **massa atomica** degli atomi. Inoltre il numero di protoni e di elettroni presenti nell'atomo neutro (detto **numero atomico**) ne determina le proprietà chimiche. Il numero di neutroni per un elemento può non essere costante, e questo spiega perché alcuni elementi hanno un peso atomico, misurato come peso ponderato di **isotopi** (atomi di uguale numero atomico ma con diversa massa atomica), non multiplo esatto del peso del protone.



Per esempio il Carbonio ha Numero Atomico 6, e questo vuole dire che il nucleo contiene sempre 6 protoni, e se l'atomo è neutro avrà 6 elettroni. Il Carbonio in natura può avere Peso Atomico 12, 13 e 14, quindi può variare il numero dei neutroni presenti all'interno del nucleo: 6, 7 e 8 neutroni sono gli unici valori permessi per la stabilità del nucleo stesso.



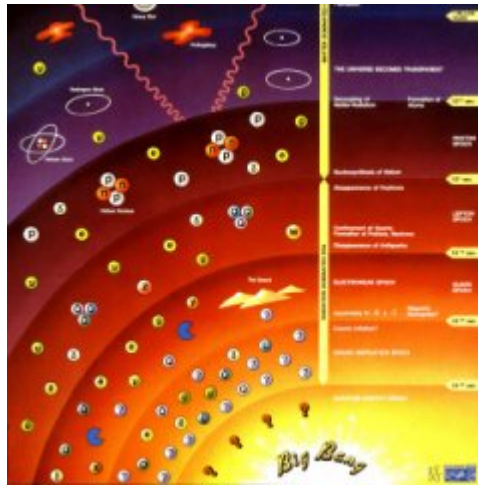
Ora che abbiamo tre ingredienti fondamentali (protoni, neutroni ed elettroni) possiamo cominciare a chiedersi come, dove e quando sono stati "cucinati" i 90 elementi chimici che troviamo in natura.

## 6. la cucina degli elementi chimici

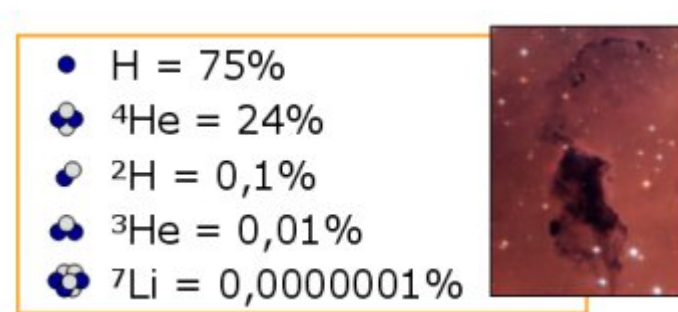
L'abbondanza di elementi chimici misurata ci dice che l'Universo è composto principalmente da Idrogeno ed Elio. La massa totale degli elementi più pesanti, di solito chiamati "metalli" dagli astronomi, è circa il 2%, e come vedremo questi vengono prodotti all'interno delle stelle. L'unica teoria che oltre a prevedere queste abbondanze spiega in modo efficace la percentuale elevata di nuclei di elio (visto che quello prodotto nelle stelle viene poi bruciato nelle successive fasi di vita stellare) è la teoria del Big Bang caldo.

### Big Bang e nucleosintesi primordiale

La teoria del Big Bang prevede che un secondo dopo il Big Bang la temperatura era di circa 10 miliardi di gradi e l'Universo era popolato da neutroni, protoni, elettroni, positroni (o anti-elettroni), fotoni e neutrini. Quando l'Universo si è raffreddato, i neutroni si sono trasformati in protoni ed elettroni oppure si sono combinati con i protoni nel deuterio, un isotopo di idrogeno. In seguito la maggior parte del deuterio si è combinata in elio e si è prodotto del litio, finché la diminuzione della temperatura e della densità resero altre fusioni improbabili.



Quindi nei primi tre minuti dopo il Big Bang si sono formati elementi leggeri (la cosiddetta **nucleosintesi primordiale**), la cui abbondanza finale in percentuale dipende dal rapporto tra fotoni e barioni (neutroni e protoni) e dal numero di specie di neutrini.



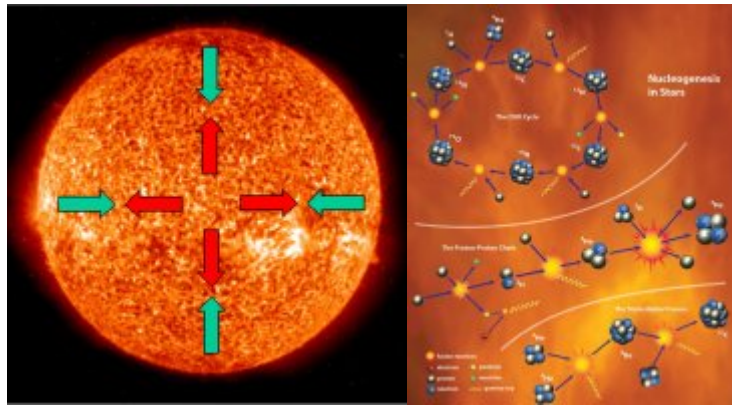
Le abbondanze relative degli elementi misurate in ambienti chimicamente poco evoluti

Nei primi istanti si sono quindi formati gli elementi più leggeri, e ancora oggi la composizione dell'Universo è principalmente di 3/4 di Idrogeno e 1/4 di Elio, mentre per gli elementi più pesanti si è dovuto aspettare che si formassero le stelle. Infatti quasi tutti gli elementi chimici del nostro corpo e del nostro pianeta sono stati "cucinati" all'interno di una stella, fanno eccezione solo l'idrogeno e il litio, che non vengono prodotti nelle stelle ma solo consumati: tutto il litio che c'è nell'Universo è un residuo della nucleosintesi primordiale! Le prime stelle hanno fornito materia prima per la successiva generazione e così via. Nelle stelle si sono costruiti gli elementi più pesanti, diffusi nell'Universo alla loro morte.

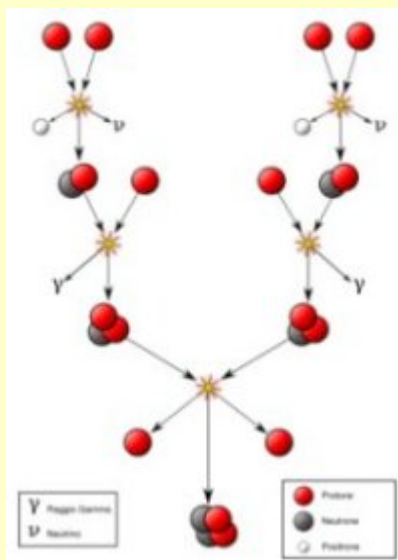
## La fusione nucleare nelle stelle

Una stella è una palla di gas tenuta insieme dalla gravità, ma che non collassa a causa della pressione che controbilancia la gravità, prodotta dal nucleo caldissimo dove viene prodotta l'energia. La diffusione dell'energia all'interno di una stella avviene principalmente per convezione e per irraggiamento. L'irraggiamento è un trasferimento di radiazione, ma i fotoni possono percorrere solo distanze molto piccole a causa dell'opacità del gas, emergendo alla superficie solo dopo molto tempo (nel Sole decine di migliaia di anni) e dopo avere perso gran parte della sua energia. La convezione, simile a ciò che avviene in una pentola d'acqua sul fuoco, è più efficace nel trasportare energia ma funziona solo in condizioni particolari, ovvero nel nucleo delle stelle massicce e nel mantello delle stelle simili al Sole.

Solo il 10% della stella è coinvolta nella generazione di energia, che viene prodotta nel nucleo. Data l'altissima temperatura e densità (nel nucleo del Sole la pressione è 300 miliardi di atmosfere e la temperatura di quasi 15 milioni di gradi) nel nucleo avvengono le reazioni nucleari, che comportano una trasformazione di un elemento chimico in uno più pesante con una perdita di massa, e questo comporta, in base alla nota formula  $E = mc^2$ , che viene sviluppata una immensa energia. Le stelle più massicce bruciano velocemente il loro carburante e quindi muoiono nel giro di pochi milioni di anni, le stelle piccole bruciano più lentamente e possono vivere diversi miliardi di anni.



A basse temperature e densità le reazioni nucleari non avvengono perché i nuclei carichi si respingono, ed è necessario che i nuclei si scontrino a velocità abbastanza elevata per superare la barriera elettrostatica (con il cosiddetto effetto tunnel) e interagire con le forze nucleari. Le stelle al loro interno bruciano innanzitutto **idrogeno**, l'elemento più semplice e più abbondante dell'Universo: nel Sole in ogni secondo 600 milioni di tonnellate di idrogeno si trasformano in elio, con una perdita di massa dello 0,7%. La fusione dell'idrogeno nelle stelle avviene con due tipi di reazioni in cui quattro protoni si trasformano in un nucleo di  ${}^4\text{He}$ : la **catena P-P**, che richiede una temperatura di circa 14 milioni di K e il **ciclo CNO**, che prevale a temperature superiori a 20 milioni di K. Il ciclo CNO è il meccanismo principale che produce azoto, elemento essenziale per la vita.



La catena P-P

### DALL'IDROGENO ALL'ELIO

Il bruciamento dell'idrogeno nelle stelle avviene secondo due cicli principali di reazioni. Il primo, detto **catena P-P** (catena protone-protone), risulta nella fusione di quattro protoni in un nucleo di He-4 e necessita di una temperatura tra 10 e 14 milioni di K.

$$1. \quad p^+ + p^+ \rightarrow {}^2\text{H} + e^+ + \nu_e \quad (1,18 \text{ MeV}) \quad (1,4 \cdot 10^9 \text{ anni})$$

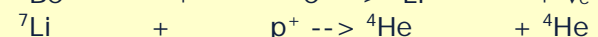
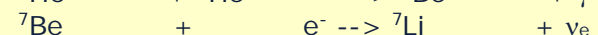
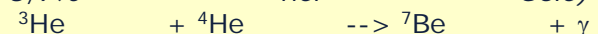
Questa reazione, mediata dalle forze deboli, è la più lenta e regola l'efficienza globale della catena.

$$2. \quad {}^2\text{H} + p^+ \rightarrow {}^3\text{He} + \gamma \quad (5,49 \text{ MeV}) \quad (6 \text{ secondi})$$

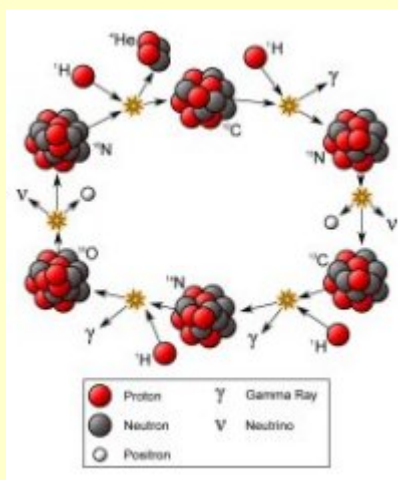
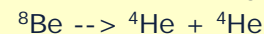
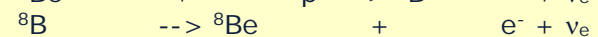
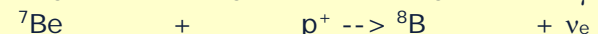
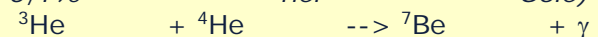
$$3. \quad \text{ramo PPI (tra 10 e 14 milioni K, frequenza: 69\% in generale, 91\% nel Sole):}$$

$${}^3\text{He} + {}^3\text{He} \rightarrow {}^4\text{He} + p^+ + p^+ \quad (12,85 \text{ MeV}) \quad (10^6 \text{ anni})$$

Questo ultimo passo della catena presenta dei rami secondari con probabilità inferiori:  
**ramo PPII (tra 14 e 23 milioni K, frequenza: 8,9% nel Sole)**



**ramo PPIII (oltre 23 milioni K, frequenza: 0,1% nel Sole)**



Il ciclo CNO

Un secondo metodo con cui le stelle più grandi del Sole possono fondere l'idrogeno e produrre l'elio è il **ciclo C-N-O**, più efficiente della catena P-P sopra i 20 milioni K. In questo ciclo il carbonio, l'azoto e

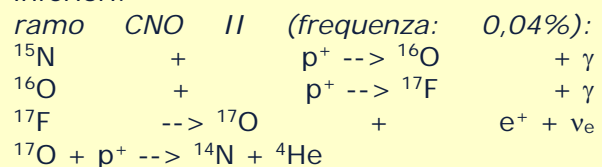
l'ossigeno vengono creati e distrutti, quindi agiscono solamente da catalizzatori della reazione.

1.  $^{12}\text{C} + \text{p}^+ \rightarrow ^{13}\text{N} + \gamma$  (1,95 MeV) ( $1,2 \cdot 10^7$  anni)
2.  $^{13}\text{N} \rightarrow ^{13}\text{C} + \text{e}^+ + \nu_e$  (1,50 MeV) (7 minuti)
3.  $^{13}\text{C} + \text{p}^+ \rightarrow ^{14}\text{N} + \gamma$  (7,54 MeV) ( $3 \cdot 10^6$  anni)
4.  $^{14}\text{N} + \text{p}^+ \rightarrow ^{15}\text{O} + \gamma$  (7,35 MeV) ( $3 \cdot 10^9$  anni)

Questa è la reazione più lenta, quindi perché il ciclo sia a regime si deve accumulare azoto (tanto che il ciclo CNO è il maggior responsabile della produzione dell'azoto-14).

5.  $^{15}\text{O} \rightarrow ^{15}\text{N} + \text{e}^+ + \nu_e$  (1,73 MeV) (82 secondi)
6. *ramo CNO I:*  
 $^{15}\text{N} + \text{p}^+ \rightarrow ^{12}\text{C} + ^4\text{He}$  (4,96 MeV) ( $1,5 \cdot 10^5$  anni)

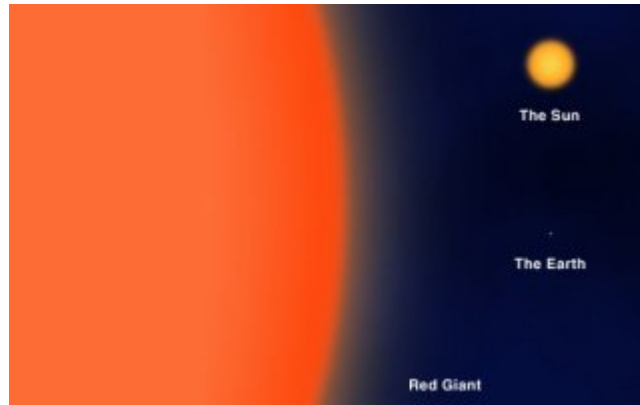
Questo ultimo passo della catena presenta un ramo secondario con probabilità inferiori:



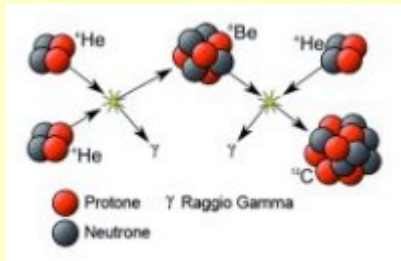
Nelle stelle meno massicce (come il Sole) nel nucleo si brucia idrogeno tramite il ciclo P-P e il trasferimento è radiativo, nell'involucro esterno l'energia si trasporta per convezione e fuoriesce all'esterno anche se il gas è relativamente freddo. Nelle stelle più massicce si brucia idrogeno con il ciclo CNO, a causa delle temperature maggiori il nucleo è convettivo (rifornendo il nucleo di idrogeno degli strati superiori) mentre l'involucro che lo circonda è radiativo.

## La fine della stabilità e lo stadio di gigante rossa

Gli elementi più comuni prodotti dalla nucleosintesi stellare sono l'ossigeno e il carbonio. Una stella resta stabile finché viene prodotta energia nel nucleo, quando l'idrogeno al centro esaurisce (nel Sole avverrà tra 4 miliardi di anni) la stella si deve adattare da un nuovo equilibrio. Infatti la pressione cala e la stella si restringe riscaldando il nucleo, permettendo nuove reazioni con la fusione degli elementi dall'elio in poi. Il carbonio si forma direttamente dall'elio nel **ciclo 3-alfa**, e l'energia liberata fa espandere l'atmosfera della stella che diventa una **gigante rossa**. In questa fase la convezione porta in superficie il carbonio prodotto nel nucleo (stelle R e N), l'elio continua a bruciare nel nucleo trasformandosi in carbonio e in ossigeno (grazie alla combinazione di un atomo di carbonio e un atomo di elio). L'idrogeno continua a bruciare nello strato successivo, al cui esterno la temperatura non consente reazioni nucleari, e questa situazione rimane tale finché la stella non esaurisce l'elio.



Confronto tra le dimensioni della Terra, del Sole e di una gigante rossa



Il ciclo 3- $\alpha$

## DALL'ELIO AL CARBONIO E ALL'OSSIGENO

Finito di bruciare l'idrogeno, il nucleo di una stella ricomincia a contrarsi e aumenta la sua temperatura finché la temperatura diventa abbastanza alta da innescare il bruciamento dell'elio, che brucia attraverso il cosiddetto **ciclo 3- $\alpha$** , in cui tre particella  $\alpha$  (nuclei di elio-4) si fondono con una reazione intermedia che produce berillio-8 in un nucleo di carbonio-12. Poiché il berillio-8 è molto instabile, Fred Hoyle propose il processo per cui nelle stelle si forma direttamente carbonio in uno stato particolare di risonanza senza che resti energia cinetica che possa distruggere il nucleo. Questo ciclo è una reazione a tre corpi, quindi dipende dal cubo della densità e necessita di una temperatura di almeno 100 milioni K.

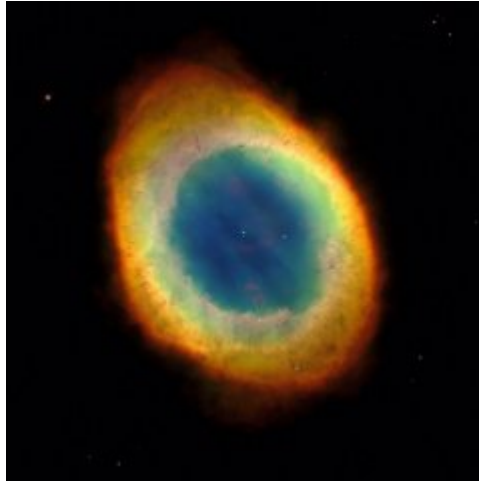
1.  $4\text{He} + 4\text{He} \rightarrow 8\text{Be} \quad (-100 \text{ keV})$
2.  $8\text{Be} \rightarrow 4\text{He} + 4\text{He} \quad (100 \text{ keV}) \quad (10^{-17} \text{ secondi})$   
 $8\text{Be} + 4\text{He} \rightarrow 12\text{C}^* + \gamma \quad (7,3 \text{ MeV})$   
 Reazione risonante che ha una probabilità maggiore della corrispondente reazione non risonante; il nucleo di carbonio nello stato eccitato decade allo stato fondamentale tramite emissione di fotoni.
3.  $12\text{C} + 4\text{He} \rightarrow 16\text{O} + \gamma \quad (7,1 \text{ MeV})$

Il tipo di accensione dell'elio dipende dalla massa della stella: se la stella è meno massiccia di 0,5 masse solari la pressione degli elettroni degeneri ferma il collasso del nucleo prima dell'accensione dell'elio, se la stella tra 0,5 e 2,25 masse solari l'elio si accende in modo esplosivo (*flash* dell'elio) in un nucleo degeneri, se la stella supera le 2,25 masse solari l'elio si accende nel nucleo non degeneri in modo non esplosivo. Il *flash* dell'elio si ferma quando la temperatura diventa tale da rimuovere la degenerazione degli elettroni, e la pressione termica fa quindi espandere violentemente il nucleo.

## 7. la fine delle stelle

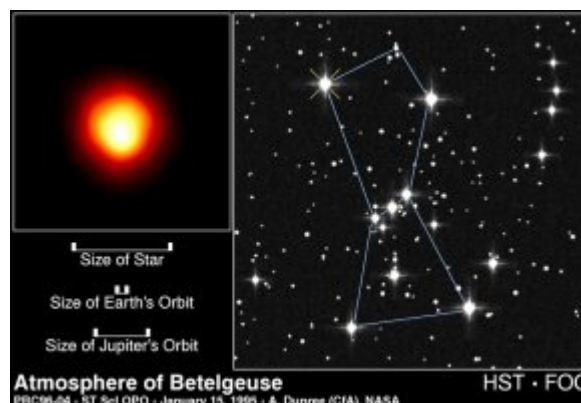
Dal 10% delle stelle con massa superiore al Sole vengono gli elementi più pesanti, in tutte le stelle una parte della massa è dispersa nello spazio nelle cosiddette **nebulose planetarie**. Giunta allo stadio di Gigante rossa, la sorte di una stella dipende dalla sua massa:

- nelle stelle come il Sole non si arriva alla fusione di carbonio, all'esaurimento dell'elio la parte esterna viene espulsa come nebulosa planetaria e al centro resta una **nana bianca**, una palla calda di carbonio e ossigeno avvolta da elio e tracce di idrogeno.



La nebulosa planetaria della Lira (M57) con al centro la nana bianca

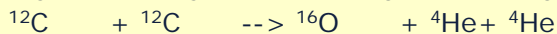
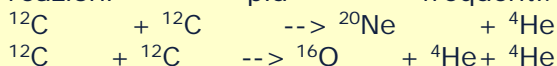
- nelle stelle con massa superiore a 8 volte la massa solare, nel collasso la stella si riscalda tanto da fondere il carbonio producendo gli elementi successivi fino al ferro. Dopo avere finito il Carbonio-12 il nucleo si contrae e si raggiungono temperature più elevate e vengono bruciati in successione il Neon-20, l'Ossigeno-16 e il Silicio-28. Ad ogni passo successivo si raggiunge una temperatura superiore ottenuta dalle successive contrazioni e la nucleosintesi continua fino alla fusione del Silicio-28 e alla produzione di Nichel-56 che decade in Ferro-56. La stella è una **supergigante rossa** che assomiglia a una cipolla, il nucleo di ferro è circondato da gusci con gli elementi più pesanti al centro e leggeri verso la superficie, e vengono prodotti gli altri elementi come il fluoro e il sodio.



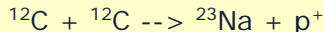
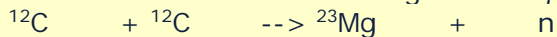
## DAL CARBONIO AL FERRO

Dopo l'elio, se la temperatura dell'interno della stella riesce a diventare abbastanza alta, il successivo combustibile ad accendersi è il carbonio. Ogni volta che termina un bruciamento, senza fonte di energia interna il nucleo si contrae e l'involuppo si espande, e quando inizia un successivo bruciamento il nucleo si espande e l'involuppo si contrae.

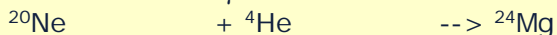
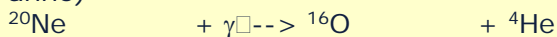
- FUSIONE DEL CARBONIO** (almeno 4 masse solari, temperatura 600 milioni di K, si esaurisce in 100 anni) reazioni più frequenti:



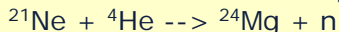
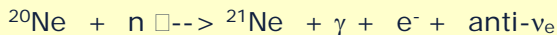
reazioni meno frequenti:



- FUSIONE DEL NEON** (almeno 8 masse solari, 1200 milioni di K, si esaurisce in 1 anno)

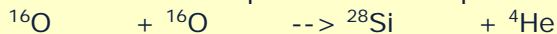


ramo alternativo:

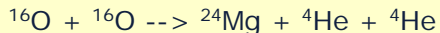
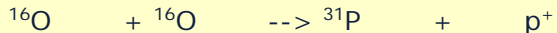
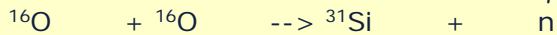
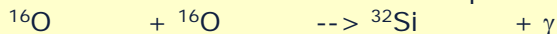


- FUSIONE DELL'OSSIGENO** (1500 milioni di K, si esaurisce in qualche mese)

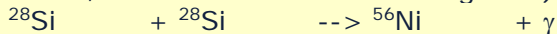
reazione più frequente:



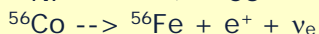
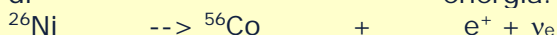
reazioni meno frequenti:



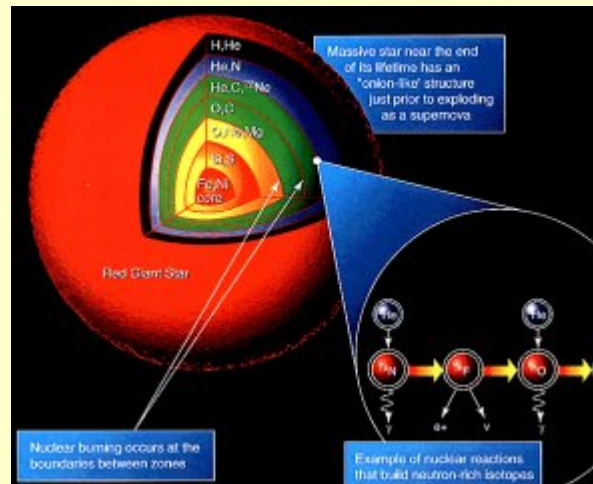
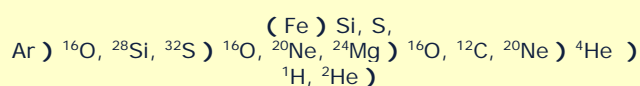
- FUSIONE DEL SILICIO** (2700 milioni di K, si esaurisce in 1 giorno)



Dal silicio-28 si formano direttamente zolfo-32, cloro-36, argon-40 e altri nuclei fino al nichel. Il nichel decade in ferro con processi di neutronizzazione (un protone cattura un elettrone producendo un neutrone e un neutrino) che necessitano di



A questo punto la stella supergigante è formata da una serie di gusci concentrici, il nucleo di ferro è circondato da strati di combustione degli elementi precedenti della serie, formando una struttura a cipolla:



Gli elementi più pesanti restano al centro, i più leggeri verso la superficie. In queste condizioni, assorbendo protoni ed emettendo positroni, si possono produrre nei vari gusci elementi con numeri di nucleoni diversi dai multipli di 4 (per esempio F-19, Na-23). Per gli elementi più pesanti del ferro occorrerà aspettare la fine violenta della stella.

La fine delle stelle massicce: supernovae, pulsar e buchi neri

Le stelle con masse superiori a 8 masse solari hanno una fine spettacolare. Infatti nel loro nucleo il ferro non può essere bruciato per produrre energia, perché il ferro è l'elemento più stabile che esista, e per creare elementi più pesanti è necessario introdurre energia. Quando la forza gravitazionale riesce a comprimere il nucleo degenere di ferro, il nucleo di ferro collassa (in una frazione di secondo da 5000 a 50 km) e si raffredda, i nuclei di ferro vengono disintegrati e i protoni catturando gli elettroni si trasformano in neutroni rilasciando neutrini. Quando il gas di neutroni raggiunge una densità di  $5 \cdot 20^{14} \text{ g cm}^3$  e diventa degenere, il collasso si ferma e parte una violenta onda d'urto che espelle violentemente tutto il materiale sovrastante nell'Universo circostante, irradiando raggi X, ultravioletti e luce visibile: la stella è diventata una **supernova di tipo II**, e in questa fase vengono generati gli elementi più pesanti del ferro. Secondo i modelli correnti le supernove di tipo Ia derivano invece da sistemi binari in cui la materia esterna di una gigante cade in una nana bianca aumentandone la massa e provocandone il collasso con il bruciamento del carbonio e la completa esplosione della stella.

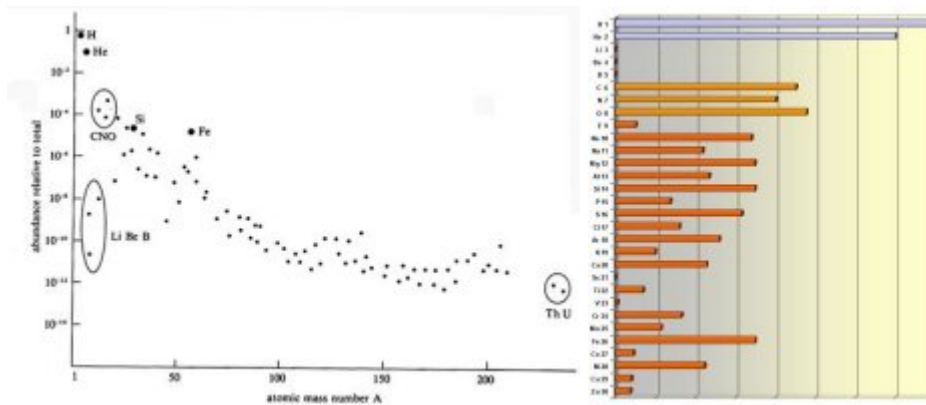


Il cielo prima e dopo l'apparizione della Supernova 1987A  
credit: [Anglo-Australian Observatory](#)

Una supernova è visibile come una stella di luminosità enorme che appare velocemente e scompare in pochi mesi. Se la materia rimasta dopo l'esplosione della supernova ha meno di 3 masse solari resta una **stella di neutroni**, che emette onde radio periodiche regolari e viene osservata come **pulsar**. Se invece il nucleo ha una massa superiore alle 3 masse solari collassa in un **buco nero**, dal quale neppure la luce può emergere. Il guscio dei gas espulsi continua ad espandersi e a raffreddarsi, come si può vedere nella nebulosa del Granchio (M1), il resto di una supernova esplosa nel 1054.

## 8. l'Universo e gli ingredienti della vita

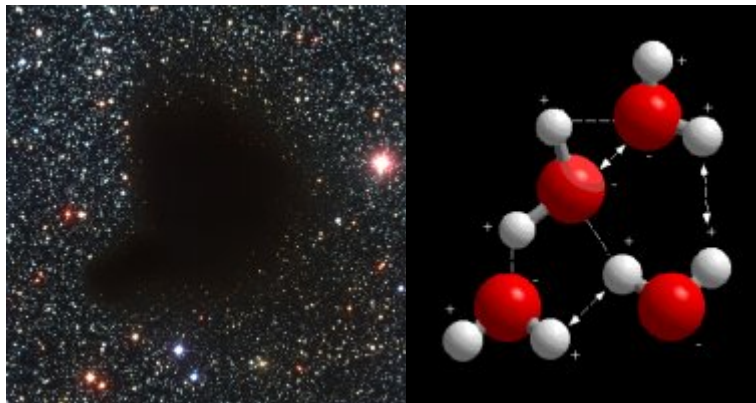
Gli atomi che compongono il nostro corpo, la Terra e i pianeti del Sistema Solare sono stati prodotti all'interno delle stelle e si sono dispersi nello spazio durante l'esplosione delle supernovae. La massa di tutti gli elementi più pesanti dell'elio è all'incirca il 2% della massa di idrogeno ed elio esistenti, mentre la massa totale degli elementi più pesanti del ferro è solo l'1% della massa totale degli elementi dal litio al ferro.



L'abbondanza chimica degli elementi.

## Le nubi molecolari

Lockyer scoprì nello spazio interstellare particelle solide. Di solito nello spazio vuoto tra le stelle c'è in media 1 atomo ogni  $15 \text{ cm}^3$  (in gran parte idrogeno), ma nelle nubi dalle quali si formano le stelle troviamo densità ben più alte, 10.000 atomi in  $15 \text{ cm}^3$ . In queste nubi sono state trovate molecole semplici e complesse, per questo motivo vengono dette nubi molecolari. Gli atomi riescono a unirsi grazie alla polvere, che proteggendo dalla luce ultravioletta evitano la distruzione dei composti chimici. Uno dei composti più comuni che presenti nella nube molecolare è l'acqua: l'idrogeno è l'elemento più comune, l'ossigeno è il 3° elemento dopo H e He, quindi dovrebbe esserci vapore acqueo, condensato direttamente in ghiaccio sui grani di polvere. In questo caso le molecole polari dell'acqua fanno sì che i granelli si attraggano.



A sinistra la nube molecolare Barnard 68 ([FORS Team](#), [VLT](#), [ESO](#))  
A destra molecole polari di acqua

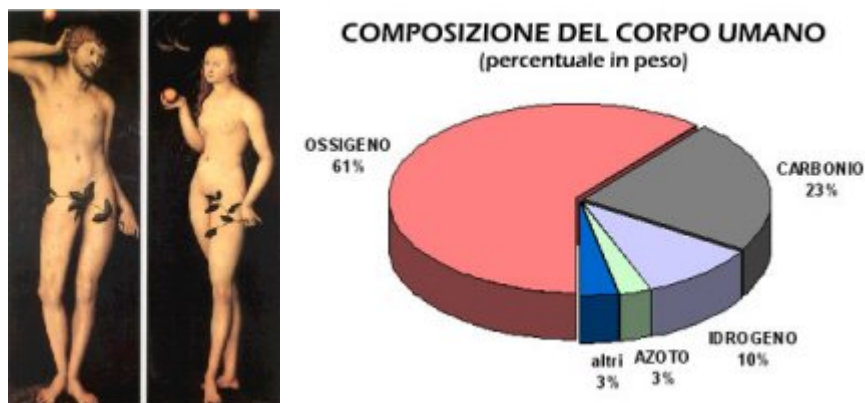
I primi composti rilevati nello spazio furono CH e CN, nel 1963 l'idrossile ( $\text{OH}^\cdot$ ), nel 1968 l'ammoniaca ( $\text{NH}_4^+$ ) verso il centro della Galassia, poi vennero scoperti l'acqua ( $\text{H}_2\text{O}$ ) e la formaldeide ( $\text{H}_2\text{CO}$ ). Fino ad ora sono state viste oltre 150 molecole nelle nubi molecolari giganti: da NO, SiO, HCN,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{HC}_2\text{H}$ , HCOOH (acido formico) a molecole più grandi.

Oltre il 90% delle stelle ha una piccola massa e produce carbonio e ossigeno: nelle stelle ricche di ossigeno si formano ossidi, nelle stelle al carbonio si producono CO e CN. Nei venti stellari si formano molecole stabili come  $\text{H}_2\text{CO}$ ,  $\text{CH}_3\text{CN}$ ,  $\text{HC}_{11}\text{N}$ ; i prodotti delle stelle dispersi nello spazio si mescolano con l'idrogeno creando la materia prima per i pianeti, molecole organiche e ossidi come l'acqua ( $\text{H}_2\text{O}$ ), gli ossidi di silicio ( $\text{SiO}_2$ ), il corindone amorfo (ossido di alluminio) e lo spinello (mescolanza di ossidi di alluminio con magnesio e ferro), tutti elementi che ritroviamo nella composizione dei pianeti. Il composto più comune nei granelli di polvere è il carburo di silicio ( $\text{SiC}$ ), ma ci sono sostanze non identificate che potrebbero essere molecole ad anello (composti aromatici come benzene o acetilene) o sostanze simili al carbone (il kerogene, simile al carbone, è stato ritrovato nei meteoriti, che sono rappresentativi della nube da cui si è formato il Sistema Solare).

## Gli ingredienti della vita

Dei 90 elementi naturali nel corpo umano se ne trovano circa 50, poco più della metà. Di questi 50 elementi solamente sei (ossigeno, carbonio, idrogeno, azoto, calcio e fosforo) costituiscono

oltre il 98% in peso e il solo ossigeno rappresenta più del 60% della massa corporea totale dell'uomo medio di riferimento.

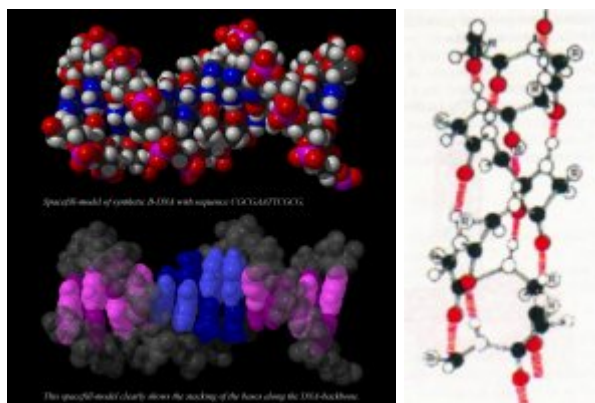


La vita che noi conosciamo è fondata sul carbonio, e il carbonio è importante per la vita per due ragioni:

1. un atomo di carbonio può stabilire 4 legami indipendenti con altri atomi, può formare anche legami doppi o tripli, ed è in grado di costruire lunghe catene
2. il carbonio è un elemento chimico relativamente comune perché viene fuso solo nelle stelle massicce.

La vita utilizza i quattro elementi più comuni dell'Universo escluso l'elio: carbonio (C), idrogeno (H), ossigeno (O) e azoto (N), gli altri sono meno usati in proporzione alla loro diffusione, con una eccezione, il fosforo, che è il 5° elemento in massa per importanza biologica, perché è in grado di legarsi contemporaneamente anche con 5 atomi.

Tra i composti essenziali per la nostra vita ci sono le proteine e gli acidi nucleici, costituiti da lunghe catene. Le **proteine** sono composte da amminoacidi, che costituiscono circa metà della massa del materiale biologico. Gli amminoacidi sono costituiti dai quattro elementi più comuni (H C O N), e in alcuni è presente lo zolfo (S). Il fatto che sulla Terra le proteine siano costituite solo da 20 amminoacidi è un indizio che la vita dovrebbe avere una origine comune. I componenti degli **acidi nucleici** sono zuccheri (detti DNA e RNA), i cui mattoni sono il ribosio o il desossiribosio e un gruppo di fosfati. Un altro composto essenziale è l'adenosina-trifosfato (ATP), che serve per immagazzinare energia nelle cellule viventi e fornisce la forza per la contrazione muscolare.



L'abbondanza di molecole complesse identificate nello spazio fa pensare che la vita sulla Terra possa essere provenuta dallo spazio. Tutti i reagenti usati per sintetizzare gli amminoacidi sono stati trovati nelle nubi molecolari giganti, molti meteoriti contengono fosforo legato al ferro e al nichel, inoltre sono stati trovati amminoacidi, acido carbossilico e zuccheri come la glicerina e il glucosio. Inoltre la vita sulla Terra usa quasi esclusivamente amminoacidi levogiri per le proteine e zuccheri destrogiri per gli acidi nucleici: negli anni '90 gli astrobiologi hanno scoperto che anche gli amminoacidi sui meteoriti sono levogiri, e forse la spiegazione sta nel fatto che è la luce circolarmente polarizzata proveniente dallo spazio ad eliminare un particolare orientamento.

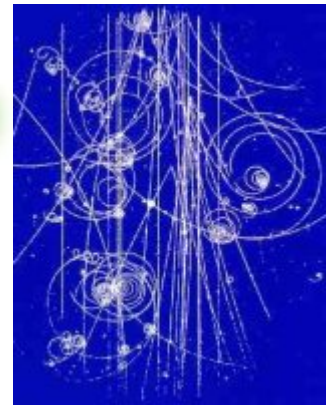
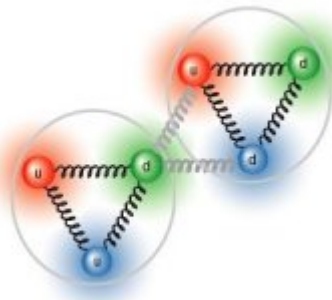
Quindi è possibile che i mattoni della vita esistessero già nella nube molecolare da cui si sono formati il Sole e i pianeti.

Ma probabilmente il modo migliore per ricevere materiale organico sono le comete, che contengono grandi quantità di acqua e composti del carbonio e che perdono parte della loro massa quando passano vicino al Sole. Nella prima fase del Sistema Solare molte comete sono cadute sul nostro pianeta (si pensa che l'acqua dei nostri oceani si sia depositata allora) e ancora oggi l'incontro delle orbite cometarie provocano sulla Terra sciami di meteoriti: riceviamo dalle comete circa 300 tonnellate di materiale organico all'anno.

*noi siamo figli delle stelle!*

## 9. ingredienti nascosti dell'Universo

Nei primi anni del 1900 i fisici si accorsero che oltre a protoni, elettroni e neutroni esistevano altre particelle emerse dallo studio dei raggi cosmici, costituiti da particelle energetiche provenienti dallo spazio. Inoltre negli acceleratori si generarono altre particelle sconosciute dai tempi di vita brevissimi, e ci si chiese da dove provenissero e quali fossero le particelle fondamentali. I fisici Gell-Mann e Ne'eman nel tentativo di classificare le particelle scoperte proposero che protoni e neutroni potessero essere costituiti da particelle ancora più elementari dette quark, che non esistono libere in natura alle nostre condizioni di densità e temperatura. Si è poi dimostrato che i protoni sono costituiti da due quark *up* (carica elettrica  $+2/3$ ) e un quark *down* (carica  $-1/3$ ), per una carica complessiva  $+1$ , i neutroni da un quark *up* e due quark *down*, per una carica complessiva nulla.



Al momento i fisici spiegano la materia e le forze che si osservano con il cosiddetto modello standard, che prevede quattro interazioni fondamentali e una serie di particelle elementari. La materia ordinaria che conosciamo è costituita principalmente da **barioni** (protoni e neutroni), che come abbiamo visto sono costituiti da quark, l'altro componente della materia è la famiglia dei **leptoni** (elettroni e neutrini) e a causa del contributo dei barioni la materia ordinaria viene detta barionica.



gravity



strong force



weak force



electromagnetism

Il modello standard e le quattro interazioni fondamentali

## La composizione dell'Universo

Gli ingredienti dell'Universo che possiamo osservare direttamente sono:

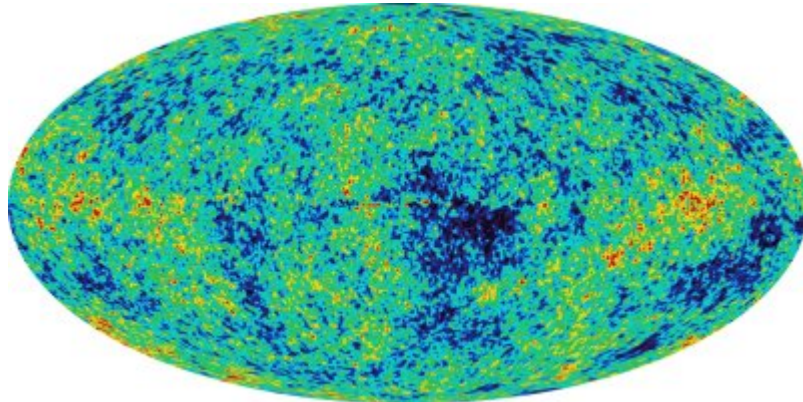
- La **radiazione**, particelle come i fotoni e i neutrini di massa nulla o pressoché nulla che si muovono a velocità relativistiche, ovvero prossime o uguali alla velocità della luce.
- La **materia barionica**, costituita principalmente da protoni, neutroni ed elettroni. E' presente per un quinto nelle stelle e nelle galassie brillanti, e per il resto nel gas interstellare, e L'Universo contiene un barione (protone o neutrone) per ogni miliardo di fotoni.



la Galassia M31 (fonte: Robert Gendler)

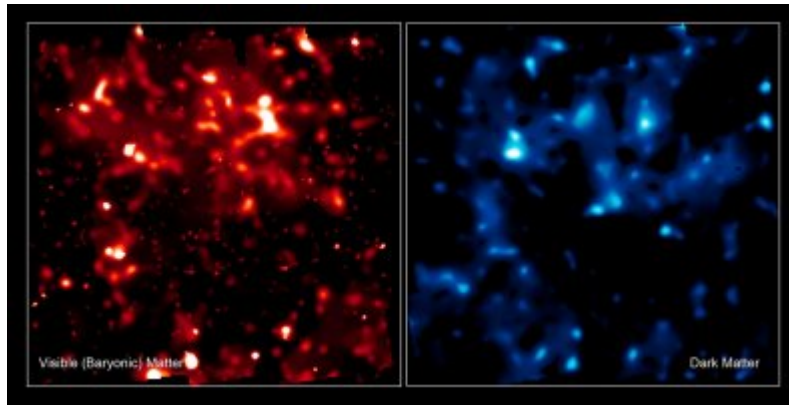
Recentemente studiando il moto delle galassie e degli ammassi di galassie si è scoperto che la massa visibile di stelle, gas e polveri è decisamente inferiore rispetto alla massa effettivamente presente, rilevata grazie agli effetti gravitazionali. Inoltre si è dedotto dalla luminosità osservata delle supernovae la che l'Universo sta accelerando.

Nel 1965 Arno Penzias e Robert Wilson scoprirono una radiazione di fondo che proviene da tutto l'Universo; questa radiazione era stata prevista da Gamow nella teoria del Big Bang. Nel momento del disaccoppiamento tra materia e radiazione si formarono gli atomi neutri e i fotoni liberi di muoversi si riversarono nello spazio come **radiazione di fondo**.



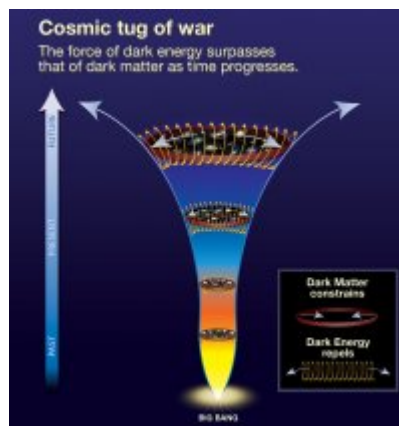
La mappa delle fluttuazioni di temperatura nella radiazione cosmica di fondo del Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (fonte: [NASA-WMAP Science Team](#))

Proprio lo studio delle fluttuazioni di temperatura della radiazione di fondo rilevate dal satellite WMAP hanno previsto la presenza di materia diversa dalla barionica. Infatti per spiegare la geometria piatta dell'Universo piatto è necessario introdurre una materia diversa dalla materia barionica, detta **materia oscura**, debolmente interagente con la materia barionica; l'unico modo di vedere la materia oscura è attraverso gli effetti gravitazionali e i candidati più probabili sono le WIMPS (Weakly Interactive Massive Particles). Si pensa che la materia oscura sia la responsabile della formazione delle strutture cosmiche a grande scala, che per la teoria del Big Bang non si sarebbero potute formare in così poco tempo con la sola materia ordinaria, e intorno alle grandi strutture di materia oscura si sarebbe aggregata gravitazionalmente la materia barionica per formare le galassie e gli ammassi di galassie che vediamo nel nostro Universo.



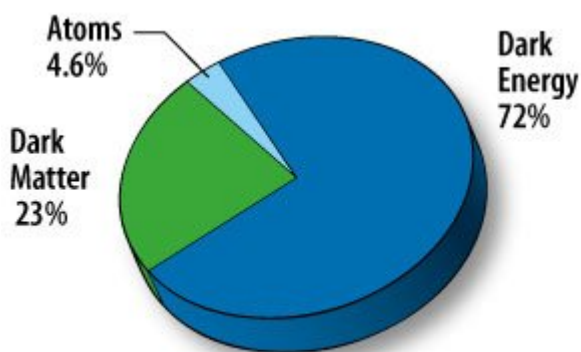
Comparazione tra la materia ordinaria (in rosso) e la struttura a larga scala della materia oscura (in blu)  
 fonte: [NASA](#), [ESA](#) and R. Massey (California Institute of Technology)

Ma lo studio delle fluttuazioni della radiazione di fondo ha mostrato che per avere un Universo è piatto la densità di materia (o di energia) misurata, anche considerando la materia oscura, non è sufficiente. La spiegazione proposta per coniugare la geometria piatta dell'Universo e l'espansione accelerata osservata è una **energia oscura**, che sia uniformemente diffusa in tutto l'Universo e che abbia un effetto antigravitazionale.



il "tiro alla fune" tra materia ed energia oscura  
 che provocherebbe l'espansione rallentata o accelerata  
 dell'Universo (fonte: [NASA/ESA](#) e A. Feild, [STScI](#))

L'energia oscura potrebbe essere una proprietà costante e uniforme del spazio, una sorta di "densità di energia del vuoto", oppure una strana forma di materia o una forma di energia non costante che all' inizio aveva la stessa densità della materia. In ogni caso i suoi effetti anti-gravitazionali sono simili alla costante cosmologica di Einstein, da lui definita un errore ma che che dopo anni di esilio si prende la sua rivincita!



Al momento il modello del Big Bang caldo integrato con la presenza di Materia oscura fredda è considerato un modello standard, e quindi si pensa che la composizione dell'Universo in percentuale alla densità di energia dell'Universo sia la seguente:

- **radiazione** (con un contributo poco rilevante alla densità, il contributo dei neutrini è intorno allo 0,4 %)
- **materia barionica ordinaria** (4,6% della densità, lo 0,4% sotto forma di stelle e galassie luminose)
- **materia oscura fredda** (23% della densità)
- **energia oscura** (72% della densità)

Siamo partiti dai quattro elementi fondamentali dei greci, successivamente nello studio della materia siamo scesi dalle molecole agli atomi, dagli atomi ai nuclei, dalla materia che conosciamo

alla materia oscura... e se ogni volta che ci siamo avvicinati alla meta qualche nuova scoperta ci ha portato lontano, se non sappiamo quanto siamo vicini alla cosiddetta verità, gli scienziati continuano e continueranno la ricerca degli ingredienti dell'universo!

