

Lezione sull'universo



L'UOMO OSSERVA L'UNIVERSO

Lucy si arrampicò sull'albero stringendo forte i rami per raccogliere qualche frutto maturo, era sera e presto calarono le tenebre della notte. Una notte africana piena di stelle, forse stette lì a guardarle ammirata o forse si addormentò su qualche ramo robusto, come fanno gli scimpanzé, forse vide le prime luci del nuovo giorno, non possiamo saperlo, perché cadde dall'albero e morì. Aveva 18 anni, non tanto giovane per una donna vissuta tre milioni di anni fa.

Il 24 novembre 1974, a Hadar, un team di paleontologi rinvennero i resti di un esemplare femmina di *Australopithecus afarensis*, la sera stessa, riuniti intorno al fuoco le diedero un nome, Lucy, prendendo spunto da una canzone dei Beatles: *Lucy in the sky with diamonds*.

Lentamente, l'*Australopiteco* progredisce, abbandona gli alberi, conquista la posizione eretta e l'uso delle mani, comincia a cibarsi di carne, il suo cervello aumenta di volume, ha consapevolezza di sé stesso, riflette su tutto ciò che lo circonda.

Mi piace immaginarlo osservare il greto disseccato di un torrente argilloso e intuire che le zolle concave possano utilizzarsi come ciotole per conservare frutta, cibo o altro.

Da tempo riesce a controllare il fuoco, cucina i cibi per renderli più teneri e preservare la dentatura, può spostarsi di notte, può difendersi dai predatori. Non è molto diverso da noi, è già un "Uomo sapiente".

Vive ancora sul continente africano ed è probabile che, a questo punto, la sua evoluzione sia rapida, vive in gruppo per difendersi dai predatori e ottimizzare la caccia. La vita media cresce e la sovrappopolazione unita alla scarsità delle risorse lo spinge ad emigrare fuori dall'Africa (o semplicemente vuole scoprire nuove terre per desiderio di conoscenza).

Questo accade 60 mila anni fa, le comunità umane probabilmente sono in grado di orientarsi con il sole e le stelle e volgendo lo sguardo al cielo l'uomo comincia ad interrogarsi sui movimenti del sole e della luna. Si rende conto del ciclo delle stagioni, osserva le stelle del cielo notturno, si accorge che alcune si muovono rispetto ad altre che sono fisse.

Ha necessità di comunicare e forse abbozza un "protolinguaggio", impara a tramandare le sue esperienze alle generazioni successive attraverso disegni sulle rocce delle caverne. Dai disegni rupestri trovati in alcune grotte possiamo già intuire le capacità artistiche di queste comunità di uomini ed il loro grado di intelligenza. Dalle più antiche pitture rupestri che risalgono a 40 mila anni fa alle più recenti, 10 mila anni fa, sappiamo che questi esseri umani, lasciata l'Africa per colonizzare il mondo, erano già in possesso di un bagaglio culturale e di una tecnica evoluta per fabbricare e manipolare i colori. Per quanto primitivo, l'uomo era già capace di elaborare idee ed esperienze e migliorare la sua tecnologia.

Solo nel secondo millennio a. C. l'uomo, studiando i meccanismi celesti, percepisce che ha in mano un nuovo strumento che collega il cielo alla terra e lui stesso agli dei.

L'invenzione degli dei credo sia la più straordinaria idea che l'uomo abbia mai avuto. Gli dei che discutono, ingannano e si combattono l'un l'altro (vedi i dieci anni della guerra di Troia) implica che nessuna di queste divinità è onnipotente e particolarmente benevola. Tuttavia sono loro che hanno creato l'uomo e ciò che lo circonda. Nascono, quindi, i "miti" e tutto sembra tornare a posto, gli dei governano le cose celesti, interagiscono con l'uomo, hanno

un aspetto umano, parlano come l'uomo, possiedono però dei "superpoteri" e sono immortali.

In Mesopotamia e Cina grazie all'attività di alcuni sacerdoti, che dalle stelle traevano auspici per prevedere eventi futuri, nacque l'*Astrologia*, le *Costellazioni* e di lì a poco l'*Astronomia*, la più antica delle scienze naturali. Venne creato un calendario legato ai cicli stagionali e lunari, con conseguenze positive per l'agricoltura e per la vita di una comunità, indispensabile per le capacità di sopravvivenza dell'uomo antico.

Nel cielo notturno le *Costellazioni* rappresentavano i miti e dai pianeti che l'attraversavano i sacerdoti potevano leggere il volere degli dei, il futuro degli uomini.

Gli eroi e gli dei erano disegnati nel cielo notturno, e questi accompagnavano la quotidianità dell'uomo antico. La volta celeste era il palcoscenico dove essi si esibivano e si mostravano all'uomo per ricordare leggende lontane nel tempo.

I primi a dare delle spiegazioni sul movimento del sole, della terra, della luna e dei pianeti furono i grandi filosofi e matematici greci. In otto secoli compresi tra il 600 a.C. e il 200 d.C. il pensiero umano fece notevoli progressi nel campo delle scienze.

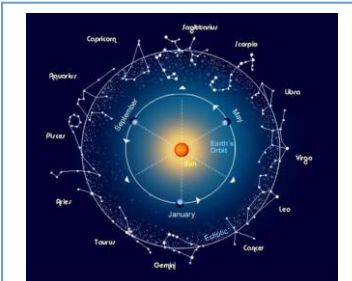
Talete, il primo dei grandi filosofi, fu forse il primo a comprendere che la terra è sferica, un secolo dopo Eratostene di Cirene misurò il raggio della Terra ottenendo una misura che differisce solo dell'1,5% dal valore attualmente conosciuto. Una semplice e geniale osservazione: durante il solstizio di estate a Siene, l'odierna Assuan, il sole allo zenit si specchiava nei pozzi perché i raggi cadevano perpendicolari alle pareti del pozzo; contemporaneamente, ad Alessandria d'Egitto (distante da Siene circa 5000 stadi egizi) un obelisco proiettava un'ombra con un angolo di circa 7 gradi (1/50 dell'angolo giro di 360°). Il calcolo della circonferenza terrestre per Eratostene fu semplice; moltiplicando la distanza delle due città per 50 ottenne 250.000 stadi. Considerando che uno stadio egiziano corrisponde a 157,5m, la conversione è immediata, 39.375km (contro i 40.075 reali) con un errore di appena 700km.

I primi argomenti sicuri contro la vecchia teoria della terra piatta sono dati da Aristotele (384-322 a.C.). Sebbene si avesse certezza della sfericità della terra dedotta da banali osservazioni dei marinai che vedevano prima le cime delle montagne e poi, avvicinandosi, le pendici, il mondo cristiano la riteneva piatta fin nell'alto medioevo: «La Terra è piatta e il Sole non passa al di sotto di essa di notte, ma si sposta attraverso le zone settentrionali come se fosse nascosto da un muro.» scriveva il vescovo Severo (400 d.C.). Cosa pensasse la maggior parte della popolazione riguardo alla forma della Terra non credo sia importante, penso che non si ponessero il problema, era solamente una diatriba tra i filosofi e la chiesa. Del resto i nostri contemporanei, scolarizzati, considerano irrilevante il *Secondo principio della termodinamica* per la loro sopravvivenza.

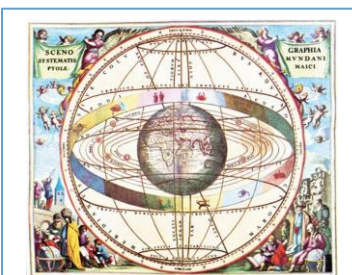
I filosofi comprendono chiaramente che la matematica può supportare efficacemente un'idea, perché esiste un "ordine cosmico" che si contrappone al "caos". Nasce la *Cosmologia*, scienza che ha come oggetto di studio l'*Universo* nel suo insieme, del quale tenta di spiegare in particolare origine ed evoluzione. In senso ontologico questa ha il compito di correggere o confutare la miriade di teorie metafisiche e religiose sulle origini del mondo.

Uno dei primi grandi sistemi filosofico-scientifici pre-moderni si deve a Tolomeo d'Alessandria (I secolo d.C.).

Questo fornisce una splendida costruzione della teoria planetaria dei cicli e degli epicicli, con la terra immobile al centro dell'universo (*geocentrismo*), nota come *sistema tolemaico*. Teoria che si opponeva a quella di Aristarco di Samo (310-230 a.C.) con il sole al centro dell'universo (*eliocentrismo*). Con



Le costellazioni



Sistema Tolemaico

Tolomeo si chiude il primo capitolo della storia dell'astronomia iniziata da Talete.



Il problema eliocentrico si ripropone con Niccolò Copernico (1473-1543), il quale dopo accurate osservazioni, misurazioni e calcoli dimostrò per la prima volta che la terra ed i pianeti ruotavano intorno al sole. I suoi risultati si conoscevano in tutta Europa anche se non erano stati ancora pubblicati perché l'ambiente ecclesiastico non accettava le sue scoperte. Pare che Copernico morente abbia ricevuta la prima copia stampata del *De Revolutionibus orbium coelestium* il giorno in cui sarebbe morto, e qualcuno scrisse che, preso fra le mani il libro, in stato di incoscienza, si sia risvegliato dal coma e, sorridendo di contentezza, si sia spento.

«Possiamo affermare con certezza che l'universo è tutto esso centro, o che il centro dell'universo sta dappertutto e la sua circonferenza in nessun luogo.» Concetto più dissacrante dell'eliocentrismo copernicano degno di scomunica per Giordano Bruno (1548-1600). Non volle mai abiurare il suo concetto di Dio, infinito, cosmo e, giudicato eretico, fu condannato al rogo dall'*Inquisizione della Chiesa cattolica*. Fu arso vivo a Roma in piazza Campo de' Fiori. La sua filosofia sopravvisse alla sua morte, ridicolizzò il sistema tolemaico, sviluppò l'idea di un universo molteplice e non centralizzato e inaugurò la *Rivoluzione scientifica*.¹

«La filosofia è scritta in questo grandissimo libro che continuamente ci sta aperto innanzi a gli occhi (io dico l'*Universo*), ma non si può intendere se prima non s'impara a intender la lingua, e conoscer i caratteri, ne' quali è scritto. Egli è scritto in lingua matematica, e i caratteri son triangoli, cerchi, ed altre figure geometriche, senza i quali mezzi è impossibile a intenderne umanamente parola; senza questi è un aggirarsi vanamente per un oscuro laberinto.» Così scrive Galileo Galilei (1564-1642), anche lui eretico per aver accettato e divulgato le teorie di Copernico, condannato da *Sant'Uffizio* e costretto ad abiurare le sue idee scientifiche.

La teoria copernicana poteva essere confermata dopo meticolose osservazioni degli astri e lo strumento che lo avrebbe permesso era stato appena inventato: il cannocchiale. Galileo se ne procurò un esemplare, lo perfezionò e invece di scrutare le navi nemiche che si avvicinavano alla costa, lo puntò al cielo. L'universo sembrò dilatarsi, avvicinarsi, splendere di nuovi astri. Le osservazioni astronomiche da quel momento ebbero un impulso che avrebbe proiettato gli scienziati verso il futuro. Galileo scoprì alcuni satelliti di *Giove*, studiò le macchie solari e ne capì la natura, vide lo scoppio di una supernova², scoprì le fasi dei pianeti *Venere* e *Mercurio*.

Siamo di fronte ad una nuova era dell'astronomia, non più empirica, ma tecnica, scientifica, matematica. Per la Chiesa cattolica e protestante quest'idea non poteva essere accettata perché la terra al centro dell'Universo era una chiara dimostrazione dell'esistenza di Dio.



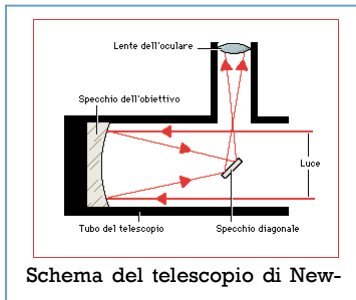
Con Giovanni Keplero (1571-1630), le figure di astronomo e matematico si fondono insieme, egli effettuò dei calcoli e si rese conto che l'idea delle orbite circolari dei pianeti ipotizzate da Copernico e avvalorate da Galileo era sbagliata. Le orbite dovevano essere ellittiche e il sole occupava uno dei due fuochi. Egli calcolò, inoltre, che la distanza della terra dal sole era inversamente proporzionale alla sua velocità di rotazione intorno ad esso ed infine, il quadrato del periodo di rivoluzione di un pianeta risultava, dai suoi calcoli, proporzionale al cubo della sua distanza media dal Sole.

Queste scoperte rappresentano le tre *Leggi di Keplero*.

¹ Da molti Giordano Bruno è considerato un precursore di alcune idee innovative della cosmologia moderna, come il *multiverso*.

² Una "nuova stella" fu osservata il 9 ottobre 1604 dall'astronomo fra' Ilario Altobelli, il quale ne informò Galileo. Luminosissima, fu osservata successivamente il 17 ottobre anche da Keplero, che ne fece oggetto di uno studio, il *De Stella nova in pede Serpentarii*, così che quella stella è oggi nota come *Supernova di Keplero*.

Manca l'ultimo tassello rivoluzionario per l'astronomia: Isaac Newton (1642-1727), il primo a dimostrare che il movimento della *Terra* e degli altri corpi celesti ubbidisce ad una *Legge di gravitazione universale*. Egli dimostrò scientificamente e matematicamente la teoria eliocentrica e le *leggi di Keplero* e contribuì alla rivoluzione scientifica e al progresso dell'astronomia.



Schema del telescopio di New-

Newton fu il primo a dimostrare che la luce bianca, passando attraverso un prisma ottico, subisce il fenomeno della *dispersione* cioè la separazione in diversi colori con diverse lunghezze d'onda dello spettro visibile. Egli avanzò l'ipotesi che la luce fosse composta da particelle (*Teoria corpuscolare della luce*) in contrapposizione ai sostenitori della *Teoria ondulatoria della luce*³. Newton si rese conto che la luce, attraversando le lenti di un telescopio, subisce una distorsione e forma degli anelli colorati (*aberrazione cromatica*). Per correggere questo difetto, costruì un *telescopio riflettore* utilizzando un grande specchio concavo per far convergere i raggi luminosi in un altro specchietto più piccolo inclinato di 45° così che esso li diriga nell'oculare. L'immagine riflessa dallo specchio concavo è notevolmente ingrandita e non presenta l'aberrazione cromatica. Da allora questa tecnica di costruzione è stata perfezionata ed è ancora impiegata nei moderni telescopi spaziali (come nel caso dell'*Hubble Space Telescope*).

DALL'OSSERVAZIONE ALLA TEORIA DEL BIG BANG

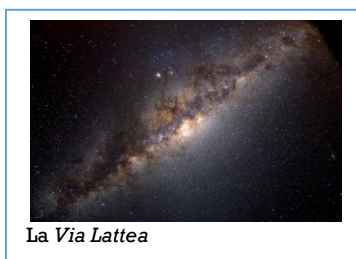
A 150km a sud-est di Los Angeles, ad un'altitudine di 1710 metri si trova l'*Osservatorio di Monte Palomar*, sicuramente uno dei più celebri osservatori astronomici, e uno dei più importanti al mondo nel settore della ricerca astronomica. Oltre al famoso *telescopio Hale* di 5 metri di apertura, ha installati due telescopi *Schmidt* utilizzati per fotografare e mappare il cielo visibile dell'emisfero nord. In questo osservatorio Edwin Hubble compì le sue osservazioni per determinare la famosa *Legge di Hubble*, nonché per completare la catalogazione dei diversi tipi di galassie.

Da osservatori come questo, installati in punti strategici della terra, gli astronomi e i fisici studiano i corpi celesti della nostra galassia, la *Via lattea*, e quelli di galassie lontane milioni di anni luce⁴. Ovvio che dopo tutte queste osservazioni, una domanda sorge spontanea: come si è formato l'universo?

Possiamo analizzare le *Teorie cosmologiche* degli antichi filosofi greci trovando materiale incredibile per formulare moderne teorie, anche se dobbiamo focalizzare l'attenzione sull'unica teoria accettabile: *La teoria del Big Bang*. La teoria della grande esplosione ha dei precedenti, poiché Eraclito ipotizzava un Universo generato dal fuoco, che variava la sua forma, dal fuoco nascono i gas che precipitano in acqua e quando l'acqua evapora lascia dei residui che sono i solidi. Gas, liquidi e solidi sono quindi tutte forme diverse del fuoco. Per Anassimene il principio era l'aria: in essa osservava i processi di rarefazione e condensazione in cui vedeva il divenire la sintesi degli opposti. In questi concetti c'è la base della *Teoria del Big Bang*.

Prima di iniziare ad esporre questa teoria, occorre precisare che essa descrive come sta evolvendo il nostro Universo, non come ha avuto inizio. Attualmente non sappiamo con esattezza, cosa c'era prima della grande esplosione, possiamo solo fare delle ipotesi. Per il momento diciamo che una *singolarità* ha prodotto l'esplosione.

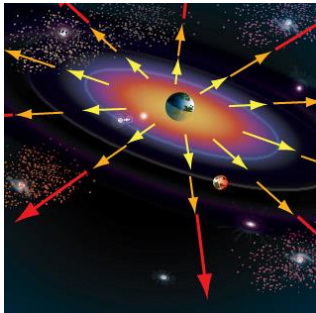
Decisiva per la formulazione della teoria del Big Bang è *Legge di Hubble*, scoperta da Georges Lemaître nel 1927 ma comunemente attribuita ad Ed-



La Via Lattea

³ Newton aveva ragione perché, circa due secoli dopo, fu confermata da Max Planck (1900) e da Albert Einstein (1905). Queste due interpretazioni coesisteranno nell'ambito della *meccanica quantistica*, come previsto dal *dualismo onda-particella*.

⁴ Si ricorda che un anno luce è il percorso fatto dalla luce, che viaggia alla velocità di circa 300 mila km al secondo, in un anno e vale circa 9500 miliardi di km.



Red Shift della luce emessa da galassie lontane

win Hubble che la enunciò nel 1929, afferma che esiste una relazione lineare tra lo spostamento verso il rosso, *red shift*, della luce emessa dalle galassie e la loro distanza: tanto maggiore è la distanza della galassia e tanto maggiore sarà il suo spostamento verso il rosso. Questo effetto è dovuto all'espansione dell'Universo e pertanto possiamo immaginare che esso si originò con un'esplosione a partire da un "punto materiale". Diciamo che prima il tempo non esisteva quindi, al momento dell'esplosione, era $t_1 = 0$. Dopo questo momento ogni particella cominciò ad allontanarsi velocemente da ogni altra particella. Nei suoi primi attimi l'Universo si può considerare come un gas caldissimo di particelle elementari in rapida espansione. Da questo gas si sono formate le galassie che attualmente sono anch'esse in espansione. Dal momento dell'esplosione ad oggi sono passati circa 14 miliardi di anni.

I dati sperimentali confermano i tre pilastri della teoria del Big Bang

1. il nostro Universo si sta espandendo e raffreddando;
2. la radiazione cosmica di fondo ha uno spettro in linea con quello di *corpo nero*;⁵
3. l'abbondanza cosmica degli elementi leggeri come l'idrogeno e l'elio ha una buona corrispondenza con quella calcolata.

Se adesso procediamo a ritroso nel tempo possiamo ipotizzare una cronologia della nascita dell'Universo. Circa 14 miliardi di anni fa, avviene il Big Bang, la *singolarità* che ha prodotto l'Universo.

Studiando i *Campi quantistici*⁶ si pensa che fluttuazioni del vuoto possono creare materia ed energia. Da questo momento l'Universo inizia ad espandersi. Si ipotizza che lo stato iniziale aveva tutti i numeri quantici uguali a zero. Probabilmente anche l'energia totale era nulla, perché l'energia cinetica, è uguale e di segno opposto all'energia potenziale gravitazionale.

Una palla lanciata in alto possiede energia cinetica che diminuisce per la forza gravitazionale terrestre (contraria) ed energia potenziale che aumenta con l'altezza. La somma delle due energie è uguale a zero.

Ora c'è da considerare una microscopica frazione di tempo $5,391 \cdot 10^{-44}$ *secondi* definita come *Tempo di Planck*. Esso può essere considerato il momento in cui si *crearono le particelle elementari*. La temperatura probabilmente aumentò a circa $5 \cdot 10^{31} K$ e l'energia cinetica media di ogni particella si ipotizza fosse di circa $6 \cdot 10^{18} \sim 10^{19} GeV$.

Ciò che realmente accadde in questa piccolissima frazione di tempo non è certa, tuttavia si possono avanzare ipotesi plausibili, dedotte in parte dagli esperimenti condotti nei grandi acceleratori di particelle. Prima di questo momento le fluttuazioni quanto-meccaniche non permettevano alle particelle di separarsi e tutto questo magma ad altissima temperatura ed energia era raccolto in uno spazio molto ristretto. Le quattro forze erano unificate poiché, man mano che aumentava l'energia in gioco, le forze tendevano a confluire le une nelle altre, l'Universo era simmetrico, caldissimo e densissimo. È questa l'epoca della *Grande Unificazione*? Forse è questa l'epoca in cui le quattro forze prendono vita e cominciano a separarsi?

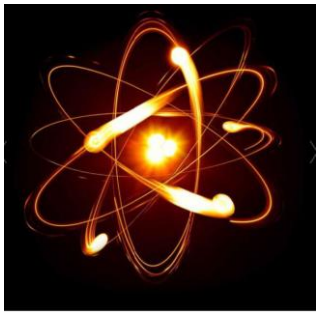
Il passo successivo è la formazione delle *particelle elementari*. Se i *quark* e i *leptoni* sono veramente i costituenti elementari della materia, l'Universo, subito dopo il *Tempo di Plank*, si può pensare come un gas di quark e leptoni, di *antiquark* e *antileptoni* e di *bosoni X, Y* mediatori della forza di *Grande Unificazione*. Infatti i leptoni e i quark si comportano come membri di un'unica famiglia; potendosi trasformare l'uno nell'altro, mentre i bosoni X



Evoluzione dell'Universo dal momento del Big Bang ai nostri giorni

⁵ Si ricorda che un *corpo nero* è un "oggetto ideale" che assorbe tutta la *radiazione elettromagnetica* incidente senza rifletterla

⁶ Quello che indichiamo come *campo quantistico* è un'entità che esiste in ogni punto dello spazio e che regola la creazione e l'annichilazione delle particelle.



Modello atomico di E. Rutherford del 1911 (modello planetario)

e γ non sono stati ancora scoperti, ma si pensa siano responsabili dell'unificazione delle quattro forze.

Si susseguono altre trasformazioni nelle quali, a rapidi passi, si formano gli *elettroni*, i *protoni* e i *neutroni*. Le quattro forze si separano completamente e l'Universo si espande rapidamente. I *fotoni* sono imprigionati in questo plasma cosmico ad alta temperatura.

Dopo 380 milioni di anni l'Universo comincia a raffreddarsi e a diventare trasparente, la luce può finalmente liberarsi e si formano i primi atomi di idrogeno ed elio.

Assieme alla materia e alle varie forme di energia conosciute c'è anche l'*antimateria*? Abbiamo la presenza della *materia oscura* e dell'*energia oscura*?

Ben presto le nubi gassose di idrogeno ed elio si addensano, ruotano vorticosamente e innescano le prime reazioni nucleari. Nascono le prime *protostelle* e l'universo risplende di luce. Probabilmente le prime *protogalassie* prendono consistenza dopo 2 miliardi di anni e diventano un grande laboratorio chimico nel quale si formano, litio, carbonio, azoto, ossigeno e ferro.

Esploscono le prime *supernovae* ed i materiali vengono scagliati nello spazio interstellare, nascono anche le *Pulsar* ed altri oggetti spaziali. L'energia oscura, dopo 9 miliardi di anni, comincia a far accelerare l'espansione e le galassie si allontanano.

La nostra *Via lattea* si consolida per contrazione gravitazionale, nasce il *Sole*. Forse l'esplosione di una stella vicina al Sole ha lanciato materiale che è stato catturato dalla nostra stella e fatto ruotare intorno ad essa, verosimilmente c'era molto materiale interstellare già esistente che ha subito delle collisioni, il risultato è la formazione dei pianeti compresa la *Terra*.

Quello che avvenne 4,5 miliardi di anni fa è pura fantasia e solo future esplorazioni potranno dare significativi contributi sulla genesi del nostro sistema solare. Per esempio è interessante l'idea di un gruppo di astronomi che ipotizzano la formazione della *Luna* dall'impatto della *Terra* con un altro pianeta grande come *Marte* a cui è stato assegnato il nome *Theia*. Parte del materiale è rimasto sulla Terra e parte nello spazio, il pezzo più grosso è stato catturato dalla Terra a formare il suo unico satellite, la *Luna*.

Le prime fasi di vita di tutto il sistema solare coincisero con il grande bombardamento iniziale da parte di un'infinità di piccoli e medi corpi celesti che altro non erano che i resti della formazione dei pianeti. La superficie della *Luna* e di molti satelliti di *Giove* e di *Saturno* portano ancora oggi le cicatrici di quegli impatti; anche la maggior parte dei crateri visibili sulla superficie del nostro satellite risalgono a quel periodo.

Nei milioni di anni che seguirono la giovane Terra si raffreddò, i materiali più pesanti precipitarono verso il suo centro mentre quelli più leggeri migrarono verso la sua superficie, imponenti attività vulcaniche produssero l'atmosfera primordiale, molto ricca di biossido di carbonio e un sottile strato di azoto, idrogeno ed elio.

L'acqua sicuramente portata dall'impatto con una cometa o da fattori endogeni, era allo stato di vapore e solo quando si abbassò ulteriormente la temperatura condensò generando gli oceani.

Circa 3,5 miliardi di anni fa nacque la prima forma di vita in una sorta di *brodo primordiale*, costituito da una miscela di acqua allo stato liquido, ammoniacca, biossido di carbonio, metano e sali minerali.

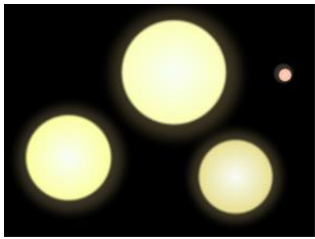
Oggi l'uomo, ultimo anello della scala evolutiva della vita sulla Terra, si chiede che cosa farà l'Universo? Quale sarà la sua *evoluzione futura*?

Due ipotesi sono per ora accettate dagli scienziati e dipendono dalla densità di materia dell'Universo.

Se la tale densità è inferiore a un certo valore l'Universo si espanderà per sempre, fino a spegnersi per mancanza di combustibile atomico che si trova



Sistema planetario del Sole



Confronto delle dimensioni e dei colori delle stelle nel sistema di α Centauri con il Sole. Da sinistra verso destra: il Sole, α Cen A, α Cen B, e Proxima.

nelle stelle. Se invece supera questo valore critico l'Universo raggiungerà un'espansione massima, comincerà a contrarsi, diventerà sempre più piccolo fino a implodere su sé stesso (*Big Crunch*).

CONTIAMO LE STELLE

Se andiamo a visitare il *Planetario di Milano* possiamo vedere la simulazione del cielo boreale all'epoca degli antichi romani, quando non c'era l'inquinamento luminoso del pianeta. Uno spettacolo che non si immagina di vedere, un cielo fitto di punti luminosi, un tetto di stelle, con la *Via lattea* ben visibile che attraversa la volta stellata.

Ma quante sono le stelle? Gli astronomi ipotizzano che la sola *Via Lattea* ne contenga circa 400 miliardi, mentre quelle che riusciamo a contare a occhio nudo non superano 6-9 mila. Se invece ci procuriamo un piccolo telescopio possiamo contarne 200 mila.

Ma **quante sono le galassie**? Ancora, gli astronomi concordano nel dire che ci sono, forse, più di 170 miliardi di galassie nell'Universo osservabile, ma potrebbero anche essere 1000 miliardi nell'intero Universo.

Più controversa è la dimensione dell'Universo. Prima domanda: è finito o infinito?

Se è nato da una *singolarità* da un punto immateriale ci dovremo trovare di fronte ad un Universo finito che aumenta il suo raggio man mano che si espande. Per un paradosso spazio-temporale, se un'astronave si trovasse ai bordi dell'Universo non potrebbe attraversarlo e resterebbe imprigionata nella bolla dell'Universo.

Dando, quindi, per scontato che l'Universo è finito e sferico (perché generato da un'esplosione) sorge spontanea la seconda domanda: qual è il suo raggio? L'Universo, in base alla sua età di 13,7 miliardi di anni e in base alla velocità della luce, che non può essere superata, avrebbe un raggio che non dovrebbe superare 13,7 miliardi di anni luce.

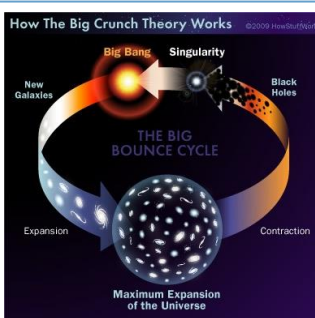
Questo non è esatto perché una galassia distante 10 miliardi di anni luce lo era 10 miliardi di anni fa; considerando che lo spazio si espande attualmente si trova distante 16 miliardi di anni luce. Più lontana dal valore ipotizzato di 13,7 miliardi di anni luce.

Ma la domanda non ha ancora avuto una risposta e la rifacciamo, **quanto è realmente grande l'universo?**

La distanza dell'orizzonte cosmologico è di circa **46,5 miliardi di anni luce**, tanta è infatti la distanza che la luce ha percorso in un tempo pari all'età dell'universo⁷. Ma ci possono essere galassie distanti 93 miliardi di anni luce che forse non vedremo mai, calcolato che il nostro Sole tra 4 miliardi di anni dilatandosi, perché alla fine della sua vita, inghiottirà la Terra.

Ed anche probabile che l'universo reale sia enormemente più grande del valore stimato, per ora possiamo dire che è solo immensamente grande, E non si può escludere che vi siano altri universi, oltre il nostro, nati per altre singolarità, ma quella dei *multiversi* è ovviamente un'altra storia.

Anticamente si pensava che le stelle fossero fisse sulla volta celeste, mentre in realtà esse si spostano relativamente a noi, in conseguenza sia del loro moto di rotazione attorno al centro della nostra galassia, sia del moto stesso del Sole (e quindi del Sistema Solare). Il moto delle stelle, pur essendo relativamente rapido, ci appare lentissimo a causa delle enormi distanze coinvolte. La stella più vicina a noi oltre al Sole, chiamata *Proxima Centauri*, dista infatti ben 4,2 anni luce (pari a circa 38.000 miliardi di chilometri). I movimenti delle stelle sulla volta celeste, detti *moti propri* sono dunque quasi im-



Il ciclo dell'Universo



La galassia di *Andromeda*

⁷ L'età dell'Universo è di 13,7 miliardi di anni, quindi la luce delle galassie distanti 46,5 miliardi di anni luce deve ancora arrivare sulla Terra.

percettibili se osservati su tempi scala molto più brevi della vita di una stella, come quello della vita umana.

Secondo la teoria della *Relatività ristretta* di Einstein, la velocità assoluta di un oggetto nello Spazio non è facilmente determinabile, poiché nello Spazio non esiste un sistema di riferimento inerziale con cui comparare, ad esempio, la velocità della *Via Lattea* (il movimento infatti deve essere in questo caso necessariamente specificato in rapporto ad un altro oggetto). Riguardo alla nostra galassia, gli astronomi credono che si muova a circa 600km/s rispetto al riferimento dato dalle galassie circostanti; se ciò fosse corretto, la *Terra* compirebbe uno spostamento nello spazio di 51,84 milioni di km al giorno, o più di 18,9 miliardi di km all'anno, circa 4,5 volte la distanza minima da *Plutone*. L'orbita solare attorno alla Galassia si ipotizza che sia approssimativamente circolare, con l'aggiunta di perturbazioni dovute ai bracci di spirale e alla distribuzione di massa non uniforme. In aggiunta a ciò, il Sole oscilla su e giù rispetto al piano galattico all'incirca 2,7 volte per orbita; ciò ricorda molto da vicino come un moto armonico semplice lavori nel caso non sia né forzato né smorzato da forze esterne. A causa della relativamente alta densità di stelle e polveri incrociate nei pressi del piano galattico, queste oscillazioni spesso coincidono con i periodi di grandi estinzioni di massa verificatisi sulla Terra, probabilmente a causa dell'aumentato rischio di impatto con corpi celesti estranei.



Ricostruzione del disco della Via Lattea

Il Sistema Solare impiega circa 225-250 milioni di anni per completare un'orbita attorno alla Galassia (un anno galattico); si pensa dunque che il Sole abbia completato durante la sua vita circa 20-25 orbite complete, mentre dall'origine dell'Uomo sarebbe trascorso appena 1/1250 del giro di rivoluzione. La velocità orbitale del Sistema Solare rispetto al centro galattico è approssimativamente di 220km/s; a questa velocità, al Sistema Solare occorrono circa 1400 anni per compiere uno spostamento pari ad un anno luce.

Torniamo a parlare di stelle ponendoci altre domande: come nasce e come muore una stella? Perché brilla? Quanto è grande una stella?

Le stelle si formano per collasso gravitazionale di una *nube interstellare di gas* (prevalentemente idrogeno, con tracce di altri gas) e polvere cosmica. Le nubi di gas interstellare sono molto grandi, con masse di gas fino ad un milione di volte quella del Sole, e hanno temperature molto basse, da circa una decina a poche centinaia di gradi sopra lo zero assoluto. Queste nubi si trovano normalmente in equilibrio, nel senso che la forza di gravità che tenderebbe a farle collassare su sé stesse è controbilanciata dalla pressione creata dal moto delle particelle al suo interno. A volte però questa pressione non è sufficiente, in certi punti la densità aumenta e la nube si contrae spontaneamente e lentamente sotto l'azione della propria gravità. È attraverso questo meccanismo che si formano le stelle di piccola massa, all'interno di nubi molto dense e oscure. Le stelle più massicce sembra che si formino invece nel collasso di nubi meno dense, causato da fattori esterni. Uno di questi può essere la compressione della nube da parte di materiale espulso ad alte velocità da stelle evolute (*nebulose planetarie* o *supernovae*). Oppure, la collisione casuale tra due nubi durante il loro moto all'interno della galassia, e il successivo collasso di una parte di esse. In realtà, le nubi di gas interstellare sono molto grandi e il loro collasso non dà origine ad una sola stella, ma ad un insieme di stelle (cioè un *ammasso stellare*), dopo aver subito una frammentazione in nubi più piccole. A loro volta, i frammenti possono dare origine o ad una stella singola o ad un sistema di più stelle che orbitano attorno ad un baricentro comune. Nella nostra galassia, per esempio, le stelle singole sono all'incirca la metà del totale. Le restanti sono raggruppate in sistemi doppi (la maggioranza) o anche multipli: sono stati osservati sistemi multipli composti di 6 stelle! Le *stelle doppie* prendono anche il nome di *sistemi binari*.

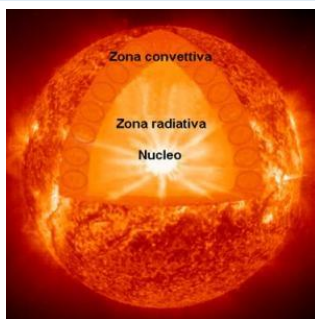


Ammasso stellare delle Pleiadi

Quando la nube si contrae, al suo interno le particelle di gas si muovono più rapidamente e il nucleo si riscalda. In questa fase, che prende il nome di *protostella*, la nube emette energia sotto forma di radiazione, anche se molto più debolmente di una stella; ciò avviene a spese della sua energia gravitazionale, che viene convertita in radiazione. Durante questa fase, la protostella ha una temperatura superficiale di 2-3.000 gradi ed è ancora immersa nella nube di gas e polvere dalla quale si è originata. Generalmente si forma un disco di gas attorno alla protostella, gas che pian piano cade su di essa. La stella, a sua volta, emette dei getti gassosi dalle regioni polari, lungo l'asse di simmetria del disco. La struttura disco con getti è molto comune nelle prime fasi della vita di una stella. In questa fase la protostella è oscurata dal materiale circostante e perciò poco luminosa; la polvere della nube circostante assorbe la radiazione emessa dall'oggetto, e la riemette a sua volta a frequenze più basse, nella regione infrarossa dello spettro, perciò le protostelle si possono rivelare in questa banda di lunghezze d'onda. Durante la fase di protostella, detta anche di *pre-sequenza principale*, la stella attraversa delle fasi di instabilità, accompagnate da variazioni di luminosità sporadiche. Si hanno quindi le cosiddette variabili *T Tauri*, dal nome di una stella di questo tipo nella *costellazione del Toro*. Il gas e la polvere che circondano la stella vengono gradualmente spazzati via dai getti di gas e dal *vento stellare* che essa emette.

La contrazione della protostella continua finché al suo interno non vengono raggiunte temperature abbastanza alte da poter dare inizio alla fusione nucleare, che sarà il suo mezzo di sostentamento per milioni o miliardi di anni; la protostella è diventata una stella. A questo punto, l'energia che essa emette non è più prodotta a spese della propria energia gravitazionale, ma a spese della propria massa: le reazioni termonucleari consistono infatti nella fusione di più nuclei atomici in un nucleo solo, di massa leggermente minore rispetto alla somma delle masse dei nuclei di partenza. La massa che viene persa nel processo è quella che si trasforma in energia secondo la ben nota *Legge di Einstein*: $E = mc^2$.

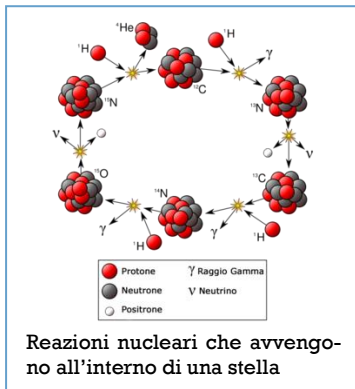
Le moderne teorie dell'evoluzione stellare pongono dei limiti di massa per le stelle, uno inferiore che corrisponde a circa 0,08 volte la massa del Sole e uno superiore, al di sopra del quale essa subisce delle instabilità e si disgrega. Questo limite è probabilmente compreso tra 100 e 120 volte la massa del Sole.



Struttura a "cipolla" di una stel-

Una stella si può pensare come una struttura stratificata, come una sorta di "cipolla", in cui ogni strato possiede un dato valore di temperatura, di densità e di pressione. Questi valori aumentano andando dalla superficie della stella verso il centro. Questa struttura di gas si trova in equilibrio tra due forze opposte: quella gravitazionale diretta verso l'interno, cioè il peso degli strati esterni su quelli più interni, e la pressione della radiazione prodotta nel nucleo della stella, che è diretta verso l'esterno. Durante tutta la vita della stella, che può durare anche decine di miliardi di anni, questo equilibrio viene sempre mantenuto, attraverso dei meccanismi di autoregolazione.

Nelle condizioni di altissime temperature e pressioni che si trovano all'interno delle stelle, tutto il gas è ionizzato. I nuclei del gas sono molto vicini tra loro e si urtano ad alte velocità. La fusione di due o più nuclei avviene quando la pressione e la temperatura sono abbastanza alte perché essi possano vincere la loro mutua repulsione elettromagnetica (dovuta al fatto che hanno una carica elettrica dello stesso segno). Le reazioni di fusione nucleare richiedono quindi due condizioni: una sufficiente abbondanza dell'elemento combustibile e una temperatura abbastanza alta per vincere la repulsione di nuclei. Ogni elemento chimico richiede una temperatura diversa per la fusione: tanto più pesante è l'elemento, tanto maggiore è la temperatura richiesta. La più semplice reazione nucleare che avviene all'interno di



una stella è la fusione dell'idrogeno: quattro nuclei di idrogeno vengono fusi in un nucleo di elio, e la lieve differenza di massa viene convertita in energia. Questa reazione può avvenire solo a temperature di almeno dieci milioni di gradi, e sostiene la stella per la maggior parte della sua vita. La stella mantiene il suo equilibrio di pressione attraverso un meccanismo termostatico: quando la produzione di energia nel centro diminuisce, essa si contrae, la temperatura interna cresce e le reazioni di fusione, che dipendono dalla temperatura del gas, accelerano. Durante questa fase la stella diventa più calda e quindi emette radiazione di lunghezza d'onda inferiore rispetto a prima. Viceversa, quando l'energia prodotta è eccessiva, la stella si espande per aumentare la superficie dalla quale può dissiparla. L'espansione fa sì che al centro della stella la pressione e la temperatura decrescano, e quindi le reazioni di fusione rallentino. Durante questa fase, la stella diventa più luminosa perché aumenta la superficie emittente, ma gli strati esterni sono più freddi e quindi emettono radiazione a maggior lunghezza d'onda. Quando l'idrogeno, che è il costituente principale della stella, comincia ad esaurirsi nel suo centro, la produzione di energia per fusione nucleare cala; la stella è costretta ad aumentare la sua temperatura interna per accendere la fusione di un combustibile più pesante e potersi sostenere. Diversamente, essa verrebbe schiacciata sotto il peso degli strati esterni e collasserebbe. Dopo l'idrogeno, la stella innesca la fusione dell'elio. Tre nuclei di elio si uniscono per formare un nucleo di carbonio, rilasciando energia. Dopo l'elio, il carbonio si fonde per formare elementi più pesanti e così via. Si formano, pertanto, l'ossigeno, il neon, il magnesio, il silicio, lo zolfo, l'argon, ecc. Le stelle sono dunque delle importantissime sorgenti di evoluzione chimica: a partire dall'idrogeno, che è l'elemento più abbondante nell'universo, nelle stelle vengono sintetizzati gli elementi più pesanti. Durante la sua evoluzione, una stella restituisce parte di questo materiale allo spazio interstellare, o attraverso processi lenti e continui come il *vento stellare*, o nel corso di fenomeni esplosivi (*nebulose planetarie*, *supernovae*); da questo gas si formeranno poi delle nubi, delle nuove stelle ed eventualmente dei pianeti. Le stelle che si formano da questo gas hanno una composizione chimica diversa da quelle che si formano da gas non arricchito. Sulla base di questa differenza, gli astronomi classificano le stelle in due gruppi: le stelle di *prima generazione* prendono il nome di stelle di *popolazione II*, mentre quelle che si sono formate successivamente da gas arricchito in elementi pesanti, sono le stelle di *popolazione I*.



Le proprietà caratteristiche di una stella sono la massa, le dimensioni, temperatura superficiale (che determina il *colore* della stella) e la luminosità, che viene descritta da una grandezza chiamata *magnitudine*. La massa di una stella, come abbiamo visto, può variare da circa un decimo a circa 100 volte la massa del Sole. Le dimensioni variano invece in un intervallo più ampio; il diametro di una stella è sempre piuttosto difficile da determinare, e può essere misurato solo per stelle vicine. Esso può variare da pochi Km per una *nana bianca* a cento milioni di Km per una *supergigante rossa*. Il colore, la luminosità e la temperatura delle stelle vengono studiate dalla *spettroscopia* e dalla *fotometria astronomica*. L'analisi di un gran numero di stelle ha permesso di individuare delle caratteristiche comuni e di suddividerle in classi, dette tipi spettrali e in classi di luminosità. Alcune stelle mostrano delle variazioni di luminosità nel tempo: alcune hanno variazioni regolari, periodiche e di entità relativamente piccola, e vengono chiamate *stelle variabili*, altre hanno variazioni enormi ed improvvise di brillantezza, dovute a fenomeni di tipo esplosivo che modificano la loro struttura: le *novae* e le *supernovae*.

UY Scuti è una stella *supergigante rossa* situata nella *Costellazione dello Scudo*, distante circa 9460 anni luce dalla Terra. Si tratta di una delle stelle più grandi conosciute, con un raggio medio 1708 volte quello del Sole. Questo record potrebbe essere battuto da un'altra stella *ipergigante rossa* *WOH*



G64 nella *Costellazione del Dorado* molto più lontana da noi, 163 mila anni luce, con un raggio non ancora determinato, che si suppone 1540-1730 raggi solari.

Il colore di una stella è indice indiretto della sua temperatura. Il modo più preciso per misurare la temperatura di una stella è quello di studiarne lo spettro, viene analizzata la luce con uno strumento detto *spettroscopio*. Le stelle vengono classificate in una sequenza di classi spettrali, secondo la loro temperatura.

Per esempio la *Zeta Puppis* è una *supergigante blu*, classe O (temperatura tra i 25-40 mila gradi); *Spica*, *Regulus* e *Rigel* sono stelle blu, classe B (temperatura tra i 11-25 mila gradi); *Vega*, *Sirio* e *Deneb* sono stelle bianco-azzurro, classe A (temperatura tra i 7,5-11 mila gradi); *Procyon*, stella bianca, classe F (temperatura tra i 6-7,5 mila gradi); *Sole*, *Alpha Centauri*, stella bianca-gialla, Classe G (temperatura tra i 5-6 mila gradi); *Arturo*, *Aldebaran* stella arancione, classe K (temperatura tra i 3,5-5 mila gradi); *Antares*, *Betelgeuse* stella Rossa (temperatura tra i 3-3,5 mila gradi).

Vi siete mai chiesti che sia la magnitudine delle stelle? Spiegato in termini semplici potremmo dire che la *magnitudine* (dal latino *magnitudo*, grandezza) si intende la misura della quantità di luce che ci arriva da un corpo celeste (stelle, galassie, nebulose...). Questa quantità di luce dipende da molti fattori come la distanza dell'astro in questione, la sua grandezza, la sua temperatura, ecc.

Guardando il cielo si vede subito che alcune stelle sono più luminose di altre. Inoltre la luce che la stella emette, durante il tragitto fino alla Terra, deve attraversare una quantità di materia interstellare che ne assorbe una parte (*assorbimento interstellare*); la stessa atmosfera terrestre contribuisce a questo assorbimento.

Per cui una stella che magari è più luminosa ma più lontana di un'altra, ci appare più debole. Sorge allora la necessità di avere un metro valido in generale per misurare la luminosità di un astro.

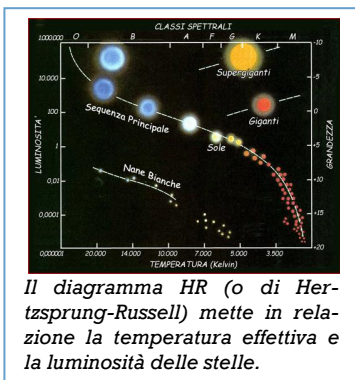
Sappiamo che vi sono stelle che appaiono più luminose di altre: per poterle confrontare in base alla propria luminosità si deve utilizzare una scala. Salvo piccole estensioni, la scala che si utilizza oggi è la stessa introdotta dai greci: si attribuisce il valore di *magnitudine apparente* uguale a 1 alla stella che in cielo appare più luminosa e 6 a quella più debole visibile ad occhio nudo.

La dicitura apparente è dovuta al fatto che ci si riferisce alle luminosità delle stelle così come appaiono viste dalla superficie terrestre. In realtà questa scala non ci permette di classificare e quindi confrontare correttamente le stelle tra di loro, in quanto la differente magnitudine apparente può dipendere sia dal diverso splendore intrinseco dell'astro sia dalla diversa lontananza dalla Terra.

Anche volendola utilizzare, si deve tener conto che la scala è di tipo geometrico, ovvero la stella di magnitudine apparente 1 non è 5 volte più luminosa di una di magnitudine 6 ma ben 100 volte. Questo fatto è legato alla *legge psicofisica di Fechner* che dice in sostanza che quando una sensazione varia con progressione aritmetica vuol dire che lo stimolo, che l'ha determinata, è variato in progressione geometrica. In ogni caso la scala non è utile così com'è e se ne costruisce una semplice trasformazione: la *magnitudine assoluta*.

Si è deciso allora di costituire un sistema di magnitudini assolute in cui si misura la luminosità che avrebbero gli astri se fossero tutti alla distanza (arbitraria) di 10 *Parsec* dalla Terra. Ricordiamo che 1 *Parsec* (PARallasse per SECondo d'arco) è la distanza da cui il semiasse maggiore dell'orbita terrestre sottende un angolo di 1 secondo d'arco ed equivale a 3,26 anni luce.

Il legame tra la magnitudine relativa (*m*) a quella assoluta (*M*) è dato dalla seguente relazione:



Il diagramma HR (o di Hertzsprung-Russell) mette in relazione la temperatura effettiva e la luminosità delle stelle.

$$M = m - 5 \log_{10} d + 5$$

dove d è la distanza della stella in *Parsec*. Da questa relazione si può notare che se si conosce la distanza di una stella se ne può determinare la magnitudine assoluta; viceversa se si conosce la magnitudine assoluta si può risalire alla distanza, e questo è quello che ci permettono di fare le *variabili cefeidi*.⁸ Il sistema per indicare le magnitudini è un po' insolito. Circa nel 127 a.C., Ipparco scrisse il primo catalogo stellare, comprendente circa un migliaio di stelle, dove l'autore indicava le più luminose come stelle di 1^a grandezza e quelle appena visibili come stelle di 6^a grandezza, con tutte le classi intermedie. Basandosi su questa prima classificazione gli astronomi moderni indicano le stelle più luminose con i valori più bassi (ormai anche negativi, dato l'enorme numero di stelle scoperte dai tempi di Ipparco), mentre i valori più elevati indicano stelle meno luminose. Per cui una stella di magnitudine relativa 2 ci appare più luminosa di una con magnitudine 5.

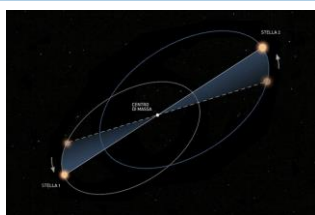
Tramite le magnitudini assolute è possibile confrontare le luminosità intrinseche delle stelle, indipendentemente dalla loro distanza. Ad esempio, la stella che ci appare più luminosa è senza dubbio il *Sole*, che ha una magnitudine relativa di - 26,8 ma una magnitudine assoluta di 4,8, per cui il nostro Sole è una stella media, meno luminosa di *Vega (Alfa-Lirae)*, con una magnitudine relativa di 0,04 ma di magnitudine assoluta di 0,5.

I problemi però non sono finiti, perché il nostro sistema visivo, l'occhio, è un recettore non in grado di rilevare che una piccola parte dello spettro elettromagnetico (lo spettro visibile) che va dal violetto al rosso. Inoltre, all'interno di questo intervallo, non tutti i colori sono recepiti con la stessa facilità in quanto l'occhio assorbe maggiormente la luce giallo-verde, essendosi evoluto in un ambiente illuminato dalla luce giallo-verde del Sole.

Per cui, quando osserviamo il cielo con l'occhio, vediamo meglio le stelle gialle e peggio quelle di altri colori. Se poi facciamo una fotografia del cielo, saranno rilevate meglio stelle di altri colori a seconde della sensibilità della pellicola alle diverse frequenze.

Quindi è necessario, quando si indica una magnitudine, segnalare con quale strumento è stata rilevata, per cui si avranno magnitudini visuali (M_v), magnitudini fotografiche (M_p) ecc.

Proprio perché vari recettori sono sensibili a lunghezze d'onda diverse, si effettuano le cosiddette *correzioni bolometriche* per calcolare le *magnitudini bolometriche*, che tengono conto delle varie lunghezze d'onda. Le magnitudini bolometriche sono quindi più "obiettive". Ogni astro perciò è caratterizzato dal suo indice di colore ($B-V$), un parametro che esprime la differenza tra la magnitudine bolometrica e visuale, indicando così il colore della stella. Se Giove avesse avuto una massa 60 volte superiore a quella che ha effettivamente, sarebbe diventato una piccola stella. Esistono stelle che arrivano ad avere una massa fino a 100 volte il nostro Sole. Viste a occhio nudo, tutte le stelle sembrano isolate l'una dall'altra, ma in realtà circa il 75% delle stelle sono *doppie* o anche più, ma troppo deboli di brillantezza per essere viste ad occhio nudo. Già con un telescopio amatoriale si riesce a scorgere separatamente. Esistono due tipi di *stelle doppie*, il primo tipo prende il nome di *doppie ottiche*, in quanto le due stelle non sono collegate fisicamente, ma si trovano, per caso, allineate nella medesima linea ottica e possono essere anche a milioni di anni luce l'una dall'altra. Questo tipo di stelle è rarissimo,



Due stelle legate gravitazionalmente tra loro e orbitanti attorno al comune centro di massa

⁸ Una *variabile Cefeide* è un membro di una particolare classe di *stelle variabili*, notevole per una correlazione molto stretta tra il loro periodo di variabilità e la luminosità stellare assoluta. Grazie a questa correlazione, e alla grande precisione con cui viene misurato il *periodo di pulsazione*, le variabili Cefeidi possono essere usate come *candele standard* per determinare la distanza degli ammassi globulari e delle galassie in cui sono contenute. Poiché la relazione periodo-luminosità può essere calibrata con grande precisione usando le stelle Cefeidi vicine, le distanze trovate con questo metodo sono tra le più accurate disponibili.

perché la maggior parte di stelle doppie sono del secondo tipo chiamato *sistema binario* dove le due stelle sono realmente legate fra loro da un cordone gravitazionale. Le due stelle, infatti, ruotano intorno ad un baricentro comune con un periodo orbitale che può essere più di cento anni. Può capitare anche che ci sia un sistema più complicato con più di due stelle, in questo caso le orbite saranno molto complicate. I fenomeni di questo tipo più frequenti solitamente comprendo 2 o 3 stelle.

Una doppia celebre è la *Doppia epsilon Lyrae* che se osservata con un discreto telescopio rivela che ogni stella ha una gemella, praticamente 2 stelle principali che hanno come satelliti altre due stelle inferiori. In molti casi neanche con telescopi potenti è possibile vedere le stelle doppie, soprattutto se sono troppo vicine fra di loro. Per poter capire se una stella è doppia gli astronomi usano lo spettroscopio che ne rivela la vera natura.

PERCORSO DELLA VITA DI UNA STELLA

Da una *nube di gas gigante*, nasce una *protostella*. Dalla quantità di materiale raccolto si può formare:

1. una *nana bruna* (massa minima perché abbia luogo la fusione dell'idrogeno, tipica di una stella, corrisponde a circa 75-80 masse gioviane),
2. una *nana rossa* (che si trasforma in una *nana bianca* ed esplose in una *nova* o *supernova*),
3. una *stella gialla* come il *Sole* (che dopo essersi trasformata in una *gigante rossa*, diventa una *nebulosa planetaria* ed infine una *nana bianca* che esplose in una *nova* o *supernova*),
4. una *supergigante azzurra* (che prima di esplodere si trasforma, a volte in una *gigante rossa*; l'esplosione porta ad una *supernova* che per collasso diventa una *stella di neutroni* e poi un *buco nero*, a volte passa direttamente a *buco nero*).

