

Sistema solare: origine, struttura e movimenti

LA LEZIONE

Introduzione

Il Sistema solare è l'insieme dei corpi celesti che sono attratti gravitazionalmente dal Sole. Oltre alla nostra stella, è costituito dai pianeti e dai loro satelliti, dai pianeti nani, dai corpi minori (come gli asteroidi e le comete) e dalle polveri e particelle del mezzo interplanetario. Il movimento dei pianeti attorno al Sole avviene lungo traiettorie ellittiche, chiamate *orbite*, ed è regolato dalle leggi di Keplero e dalla legge di attrazione gravitazionale.

Il Sistema solare è localizzato in un braccio della Via Lattea (*fig. 1*), poco distante dal piano centrale del disco galattico, dal cui centro dista quasi 27.000 anni luce. Si sposta con un moto di traslazione verso la costellazione di Ercole, a una velocità di circa 70.000 km/h, e si muove, seguendo la rotazione della nostra galassia, lungo un'orbita quasi circolare attorno al centro galattico, compiendo un giro completo in circa 200 milioni di anni, alla velocità di circa 980.000 km/h.

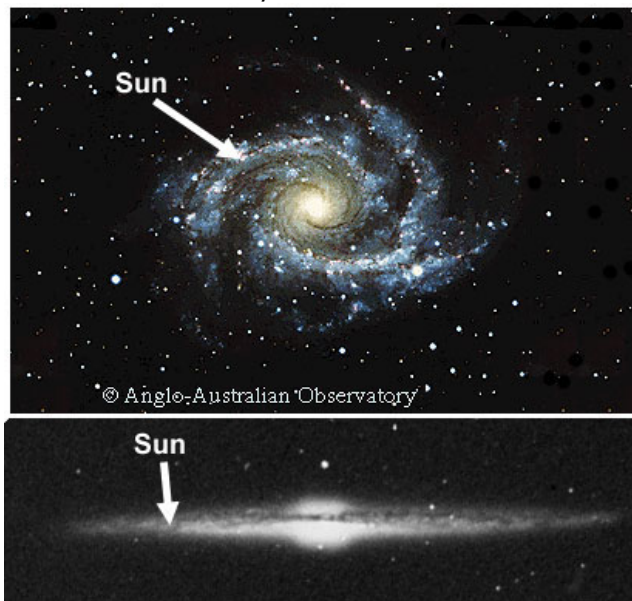


fig.1 Localizzazione del Sistema solare nella Via Lattea

Soltanto una porzione molto piccola del Sistema solare, esteso svariati miliardi di

chilometri, è occupata dall'insieme dei corpi celesti in esso contenuti: tra tali corpi si trovano gas, polvere e particelle elementari.

Il confine del Sistema solare non è definito con precisione; un modo per farlo è stabilire la sua estensione in base al limite oltre il quale non si sentono più gli effetti del campo magnetico solare. La sonda Voyager ci dà l'opportunità di fare un po' di chiarezza su tale questione. Il 13 settembre 2013 si trovava a 19 miliardi di chilometri di distanza dalla Terra, diventando così ufficialmente il primo veicolo umano a entrare nello spazio interstellare. La sonda ha attraversato la cosiddetta bolla solare, ossia la regione di particelle cariche che circonda il Sole, mentre nell'estate del 2012, a 18 miliardi di chilometri di distanza, i suoi strumenti avevano rilevato ancora improvvisi aumenti del campo magnetico solare. [Il video](#) di apertura, riferito al giugno 2013, quando ancora Voyager non era entrata nello spazio interstellare, illustra le difficoltà che si incontrano nel definire con chiarezza l'estensione del Sistema solare.

Origine

La formazione del Sistema Solare risale a circa 4,6 miliardi di anni fa, quando la contrazione gravitazionale di una nube costituita da gas (per il 99%) e polvere diede luogo a una condensazione centrale (il Sole nascente o proto-Sole) e a una nebulosa composta da tutto il materiale residuo distribuito lungo un disco in rapida rotazione, dalla quale ebbero origine per condensazione i cosiddetti planetesimi, corpuscoli di varie dimensioni, che, aggregandosi, formarono poi, dopo milioni di anni, i pianeti (*fig.2*). Dalle componenti di dimensioni minori sono nati invece le comete e gli asteroidi. I planetesimi, di diametro fino a qualche chilometro, possono considerarsi i 'mattoni' per la costruzione dei pianeti. Quando raggiunsero masse notevoli, cominciarono ad attirarsi a vicenda con forze crescenti e a urtarsi a velocità più elevate. A seconda della loro massa, gli effetti degli urti erano diversi: i planetesimi più piccoli si disgregavano, mentre quelli più grandi,

grazie al loro più intenso campo gravitazionale, riuscivano a catturare i corpi con i quali collidevano.

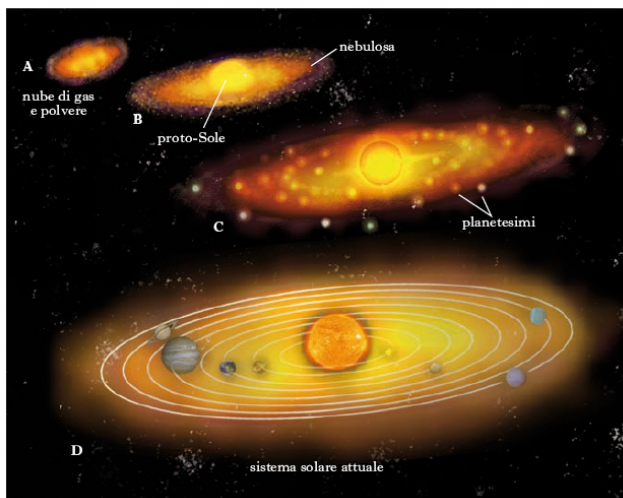


fig.2 Origine e formazione dei pianeti del Sistema solare - La figura illustra la nube di gas e polvere (A); la nebulosa solare e il protoSole (B); l'accrescimento collisionale e il collasso gravitazionale con la formazione dei planetesimi (C); il sistema solare attuale (D)

I planetesimi più grandi, che erano gli unici a sopravvivere e ad accrescersi a ogni collisione, si comportarono pertanto come delle vere e proprie spugne gravitazionali, assorbendo un po' alla volta tutti i materiali più minuti che si trovavano lungo la loro orbita. Le collisioni produssero una grande quantità di calore, che si accumulò all'interno dei pianeti a seconda della loro distanza dal Sole. Questo processo, detto *accrescimento collisionale*, fu relativamente rapido: simulazioni al computer hanno mostrato che, partendo da una moltitudine di piccoli aggregati di polvere, si arriva a formare un corpo delle dimensioni di Marte in appena 100.000 anni.

Quando il processo di formazione dei pianeti poteva dirsi quasi concluso, i planetesimi residui erano ancora numerosi. Molti di essi vennero via via catturati dai pianeti maggiori o dai loro satelliti; gli impatti che ne conseguirono scavarono crateri, a volte enormi, nella crosta di tutti i pianeti che ne erano dotati. La pioggia meteoritica più intensa durò alcune centinaia di milioni di anni: essa subì un brusco rallentamento circa 3,9 miliardi di anni fa, come è provato dalla più bassa densità di crateri sulle superfici planetarie

formatesi in epoca successiva. Non tutti i planetesimi vennero però catturati. Alcuni, infatti, nel corso di incontri ravvicinati con i pianeti giganti, furono sospinti dal campo gravitazionale di questi agli estremi confini del Sistema solare: sono le comete, corpi ghiacciati che orbitano a enormi distanze dal Sole finché qualche perturbazione non li fa precipitare nelle regioni interne del Sistema solare.

La distanza dei planetesimi dal Sole ha determinato la loro struttura e composizione chimica: quelli più lontani dalla nostra stella, dove la temperatura era minore, erano costituiti soprattutto da ghiaccio e gas, mentre i planetesimi situati nella parte interna della nebulosa protoplanetaria erano composti prevalentemente da rocce e metalli (avendo perso per evaporazione gli elementi volatili). Ciò spiega anche la diversa composizione chimica dei pianeti: quelli interni (ossia Mercurio, Venere, Terra e Marte) hanno i nuclei costituiti soprattutto da silicati e metalli, mentre quelli esterni (Giove, Saturno, Urano e Nettuno) sono composti sostanzialmente da idrogeno ed elio (gli elementi di gran lunga più abbondanti nell'Universo), che erano presenti soprattutto nelle regioni estreme e più fredde della nebulosa protoplanetaria, e hanno quindi una composizione chimica simile a quella della nebulosa da cui si sono originati.

Ormai è accertato che i pianeti del Sistema solare si sono formati quasi contemporaneamente al Sole. I dubbi su tale conclusione sono stati allontanati dalle molteplici regolarità che si osservano nella struttura e nei movimenti dei corpi del Sistema solare, ma anche da diverse scoperte effettuate, in particolare dall'abbondanza di alcuni elementi chimici presenti nelle atmosfere dei pianeti più grandi e nelle meteoriti, che è più simile a quella che si trova tra le stelle piuttosto che a quella attuale del Sole: ciò significa che la materia che costituisce i pianeti non può derivare da quella già trasformata nelle reazioni nucleari che avvengono all'interno della nostra stella.

Questo modello di formazione del Sistema solare ha trovato ampie conferme dalle osservazioni, dal momento che si è

scoperta l'esistenza di altre nebulose protoplanetarie attorno ad altre stelle, oltre che di pianeti in orbita attorno a stelle assai maggiori di quelli interni diverse dal Sole. Il Sole si è formato quindi (complessivamente, essi rappresentano come tutte le altre stelle, dalla contrazione oltre il 99% della massa di tutti i pianeti) di una nebulosa, ricca di idrogeno, elio e polveri, che sotto la spinta della forza gravitazionale ha portato alla formazione di una zona centrale più densa e calda (vedi lezione sull'[Evoluzione stellare](#)). La nube ha assunto poi l'aspetto di un disco appiattito rotante attorno alla regione centrale (proto-Sole), più densa e calda rispetto alle zone più esterne della nebulosa.

Struttura

I pianeti del Sistema solare sono otto. In ordine di distanza dal Sole essi sono: Mercurio, Venere, Terra, Marte, Giove, Saturno, Urano e Nettuno. I primi quattro compongono l'insieme dei pianeti *interni* (o *rocciosi* o *terrestri*), corpi solidi costituiti da rocce, sabbia e polveri, nei quali si verificano fenomeni geologici che possono interessare le loro superfici; possiedono atmosfere più o meno spesse costituite da gas pesanti (azoto, ossigeno, anidride carbonica) e che influenzano la temperatura del pianeta. I secondi quattro sono detti pianeti *esterni* (o *gassosi* o *gioviani*), enormi sfere gassose con piccoli nuclei solidi e temperature molto basse a causa della loro distanza dal Sole; sono avvolti da strati di gas leggeri (idrogeno, elio, metano, ammoniaca) e sono caratterizzati dalla presenza di sistemi di anelli.

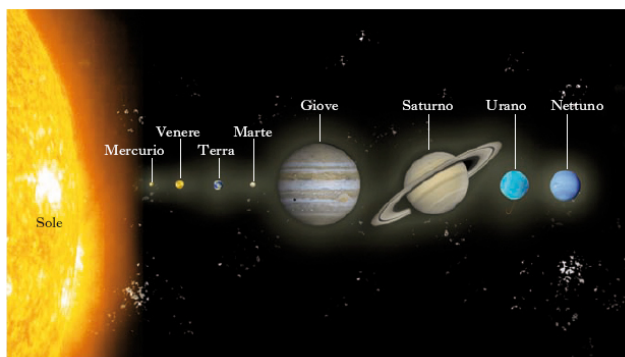


fig.3 Confronto fra le dimensioni del Sole e quelle dei pianeti interni ed esterni del Sistema solare

La fig.3 mette a confronto le dimensioni del Sole e quelle dei pianeti. Le principali proprietà dei pianeti del

Sistema solare sono elencate nella *tab. 1*. I pianeti esterni hanno dimensioni e masse diverse dal Sole. Il Sole si è formato quindi (complessivamente, essi rappresentano come tutte le altre stelle, dalla contrazione oltre il 99% della massa di tutti i pianeti).

PROPRIETÀ FONDAMENTALI DEI PIANETI

pianeta	simbolo	distanza media dal Sole (10 ⁸ Km)	periodo di rotazione (giorni)	periodo di rivoluzione (g=giorni; a=anni)	diametro (km)	massa (kg)	densità media (g/cm ³)	densità non compressa (g/cm ³)
Mercurio	☿	57,9	58,65	87,97 g	4878	3,30·10 ²²	5,42	5,3
Venere	♀	108,2	243,0	224,70 g	12104	4,87·10 ²⁴	5,25	4,4
Terra	♁	149,6	1,00	365,26 g	12756	5,98·10 ²⁴	5,52	4,4
Marte	♂	227,9	1,026	686,98 g	6787	6,42·10 ²³	3,94	3,8
Giove	♃	778,3	0,410	11,86 a	142800	1,90·10 ²⁷	1,31	1,2
Saturno	♄	1427	0,426	29,46 a	120660	5,69·10 ²⁶	0,69	0,6
Urano	♅	2869	0,75	84,01 a	51118	8,68·10 ²⁵	1,29	1,2
Nettuno	♆	4496	0,80	164,80 a	49528	1,02·10 ²⁶	1,64	1,5

Tabella Proprietà fondamentali dei pianeti del Sistema solare

Le loro densità sono, invece, basse (fra 0,7 e 1,6 g/cm³) rispetto a quelle dei pianeti interni (comprese fra 3,9 e 5,5 g/cm³). A tali differenze di densità corrispondono le diverse composizioni chimiche. Assai diverse, sia per composizione sia per origine, sono le atmosfere dei due gruppi di pianeti. Le atmosfere dei pianeti esterni sono primitive, cioè consistono, in larga misura, dei gas (idrogeno ed elio) della nebulosa solare primordiale; le atmosfere dei pianeti interni sono, invece, secondarie, cioè consistono di gas (anidride carbonica, azoto, ossigeno ecc.), che hanno avuto origine in processi, come l'attività vulcanica o biologica, intervenuti in un'epoca successiva alla formazione dei pianeti. Queste differenze sono legate alle masse dei pianeti dei due gruppi: infatti, i pianeti esterni, grazie al loro intenso campo gravitazionale, hanno trattenuto, almeno in parte, i gas più leggeri della loro atmosfera primordiale, mentre i pianeti interni, meno massicci, li hanno dispersi completamente nello spazio. Un caso particolare è rappresentato da Mercurio che, a causa della sua piccola massa e della vicinanza al Sole, è rimasto praticamente privo di atmosfera. Il confine tra i pianeti interni e quelli esterni è segnato dalla cosiddetta *fascia* (o *cintura*) *asteroidale*, costituita da milioni di corpi rocciosi le cui orbite sono influenzate soprattutto dall'attrazione gravitazionale di Giove, il pianeta più grande del Sistema solare, che impedisce loro di unirsi per formare un corpo di dimensioni maggiori. In questa zona il processo di accrescimento collisionale primordiale venne a un certo punto bloccato proprio

dal campo gravitazionale di Giove, che si era formato nelle vicinanze: gli attuali pianetini rappresenterebbero pertanto delle specie di 'planetesimi fossili', che non riuscirono mai a evolversi in un vero e proprio pianeta. Lo studio degli asteroidi è pertanto molto importante per risalire alle condizioni primordiali del nostro sistema stellare e si sfrutta per esempio per ricavare l'età del Sistema solare, come vedremo più avanti.

Agli estremi del Sistema solare è inoltre localizzata la *nube di Oort*, un ipotetico guscio sferico con centro nel Sole che si pensa sia il luogo da cui provengono le comete di lungo periodo; si suppone che queste si siano formate da planetesimi condensati nella regione di Urano e Nettuno e siano poi state scagliate verso l'esterno a causa delle interazioni gravitazionali con i pianeti giganti.

Cos'è un pianeta?

Nella fase di elencazione dei pianeti del Sistema solare è molto probabile che qualche alunno obietti la mancanza tra essi di Plutone (se così non fosse, si può chiedere agli alunni se a loro parere nell'elencazione dei pianeti ne manca qualcuno). In effetti, fino a qualche anno fa Plutone era inserito a tutti gli effetti tra i pianeti del Sistema solare, ma la continua scoperta di nuovi corpi ghiacciati più grandi di esso nella cosiddetta 'fascia di Kuiper', situata oltre l'orbita di Nettuno, ha dapprima alimentato il dibattito sullo *status* di questi corpi estremi del Sistema solare, denominati KBO (*Kuiper Belt Object*), rispetto a Plutone stesso - ci si chiedeva, infatti, perché tali corpi fossero considerati asteroidi mentre Plutone no, nonostante si trovi nella stessa regione di cielo e ha dimensioni simili -, e successivamente ha reso necessario un intervento da parte dell'IAU (International Astronomical Union) per risolvere tale questione.

Il 24 agosto 2006 l'IAU, durante l'assemblea generale annuale, ha ridefinito il termine 'pianeta' nel seguente modo: un pianeta è un corpo celeste che (a) è in orbita attorno a una stella (e non attorno a un altro oggetto celeste), (b) ha una forma approssimativamente sferica e in equilibrio

idrostatico (dovuta al campo gravitazionale generato da una quantità di massa sufficiente) e (c) non incontra altri corpi celesti nelle vicinanze. L'ultima condizione è quella che declassa Plutone: chiariamola un po' meglio. Essa si riferisce al processo evolutivo di accrescimento mediante cattura e aggregazione dei corpi circostanti, che per un pianeta dev'essere terminato. Il campo gravitazionale esercitato da un pianeta influenza infatti i corpi celesti che percorrono orbite a esso vicine (a eccezione delle sue lune), per esempio comete e asteroidi, per cui un pianeta deve aver 'ripulito' dagli altri corpi celesti la regione prossima alla sua orbita. Plutone si trova in una regione del Sistema solare (*fig.4*) piena di corpi celesti ghiacciati, per cui per esso tale condizione non è verificata. Plutone fa ora parte di una nuova classe di corpi denominata dei *pianeti nani*.

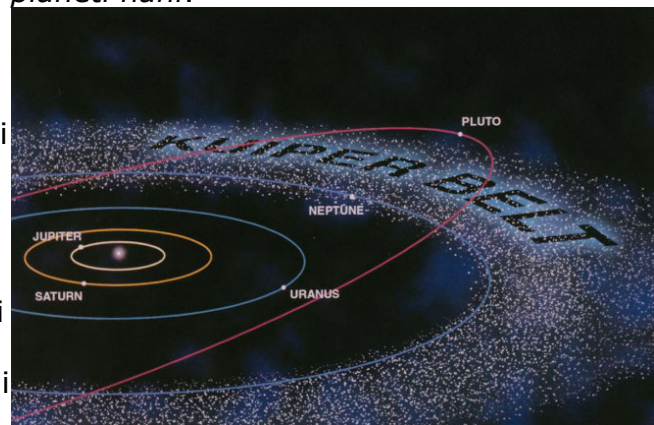


fig.4 Orbita di Plutone nel sistema solare

Elementi orbitali

L'orbita di un pianeta è definita da diversi elementi (*fig.5*): il semiasse maggiore a , l'eccentricità e , l'inclinazione i tra il piano dell'orbita e il piano di riferimento, la longitudine del nodo ascendente Ω , contato dal punto gamma (o vernale) al nodo ascendente, la distanza angolare tra perielio e nodo o e l'istante T del passaggio al perielio. L'orbita è descritta rispetto a un piano di riferimento, che è scelto essere quello dell'orbita terrestre (l'eclittica). I due punti in cui l'orbita interseca il piano di riferimento sono detti *nodi* (ascendente e discendente) e la linea che li congiunge è detta *linea dei nodi*.

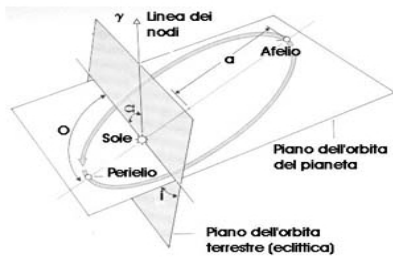


fig.5 Elementi dell'orbita di un pianeta

Per individuare l'orbita sono necessarie almeno tre osservazioni che fissino tre coppie di valori, ossia tre coordinate nel sistema eclitticale; con questi dati è possibile trovare i sei elementi orbitali necessari e sufficienti per determinare l'orbita. La via che normalmente si segue è la seguente.

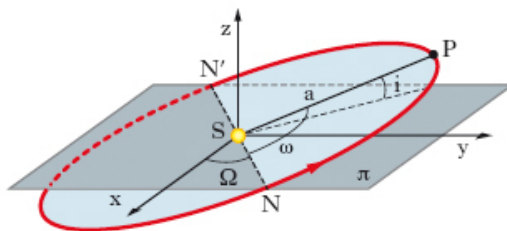


fig.6 Coordinate orbitali riferite al piano dell'eclittica

Riferendoci al piano n dell'eclittica (si segua la fig.6) a una certa epoca, per es., alla mezzanotte del 1° gennaio 1900, viene introdotta una terna cartesiana di riferimento, con origine nel Sole S , asse x diretto verso il punto vernale (intersezione, sulla sfera celeste, dell'eclittica con l'equatore all'equinozio di primavera), asse y a esso perpendicolare lungo il piano dell'eclittica, asse z diretto verso l'emisfero celeste contenente il polo celeste Nord. Chiamato *nodo ascendente* dell'orbita il punto N in cui l'orbita taglia il piano dell'eclittica in corrispondenza al passaggio da valori negativi a valori positivi della coordinata z (l'altro punto N' di intersezione è il nodo discendente), un primo elemento è la longitudine del nodo, cioè l'angolo Ω che la linea dei nodi, $N'N$, forma con l'asse x , contato, come ogni altro angolo, nel verso diretto, vale a dire nel verso antiorario. Un secondo elemento, che insieme con il precedente individua la giacitura del piano dell'orbita, è l'inclinazione, cioè l'angolo diedro i che ha per spigolo la linea dei nodi e per facce la parte del piano dell'orbita per cui si hanno

coordinate z positive e la parte del piano dell'eclittica per cui si hanno coordinate y positive. Per orbite dirette (come accade per tutti i pianeti) i è minore di 90° , mentre per orbite retrograde (come accade per varie comete) i è maggiore di 90° (per es., per la cometa di Halley, si ha $i=162^\circ$); così, i informa immediatamente, con il suo valore, se l'orbita è diretta o retrograda. Un terzo elemento, che individua l'orientamento dell'asse maggiore dell'orbita, è la distanza del perielio dal nodo, cioè l'angolo ω che SN , congiungente il Sole con il nodo, forma con SP , congiungente il Sole con il perielio P . Per precisare la forma dell'orbita bastano poi il semiasse maggiore a (usualmente espresso in unità astronomiche) e l'eccentricità e ; infine, come sesto e ultimo elemento si assume l'istante del passaggio al perielio, cioè l'istante al quale il pianeta occupa una ben determinata posizione.

Età

L'età del Sistema solare si può ricavare analizzando la struttura chimica degli asteroidi (detti anche *planetini*), distribuiti soprattutto, come detto, nella zona orbitale tra Marte e Giove. Questi piccoli corpi (e in particolare quelli ricchi di metalli, chiamati *condriti*) sono molto importanti dal punto di vista della ricerca, perché la loro struttura non è stata sostanzialmente modificata dai processi geologici che hanno invece interessato i pianeti, e sono quindi costituiti dai materiali più antichi del Sistema solare. L'analisi chimica dei meteoriti caduti sulla Terra e lo studio della loro composizione isotopica indica con buona approssimazione un'età di 4,6 miliardi di anni.

Un metodo utilizzato per stabilire l'età del Sistema solare fa riferimento al decadimento radioattivo degli isotopi contenuti nelle rocce meteoritiche. Le seguenti considerazioni di chimica elementare illustrano il procedimento. Ogni elemento chimico è costituito da un miscuglio di atomi che hanno lo stesso numero di protoni (particelle cariche positivamente) e di elettroni (particelle cariche positivamente), che determina le proprietà chimiche dell'elemento, e da un numero di neutroni che è differente da

isotopo a isotopo, che determina le proprietà fisiche dell'elemento, poiché il numero di neutroni di un atomo contribuisce a determinare la sua massa (la *fig.7* illustra, a titolo di esempio, la struttura interna degli isotopi dell'idrogeno e del carbonio).

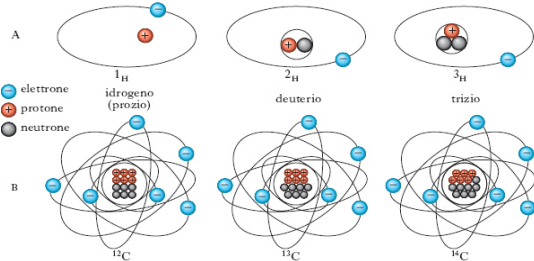


fig.7 Struttura interna degli isotopi dell'idrogeno (A) e del carbonio (B)

Un isotopo è quindi una differente versione di uno stesso elemento chimico. Gli isotopi possono essere stabili o instabili (ossia radioattivi); questi ultimi decadono emettendo energia sotto forma di particelle o di radiazione. Gli isotopi stabili sono di gran lunga i più abbondanti e gli altri possono anche essere molto instabili. Conoscendo il tasso di decadimento, il parametro che permette di valutare l'età del Sistema solare è la quantità dei prodotti degli isotopi radioattivi contenuti nei meteoriti, in pratica il rapporto tra le abbondanze degli isotopi stabili e quelli instabili.

Movimenti

Il movimento che i pianeti compiono attorno al Sole è regolato dalle tre leggi di Keplero, dal nome dell'astronomo che le scoprì nel 17° secolo. La prima legge riguarda la forma dell'orbita e stabilisce che i pianeti, compresa la Terra, si muovono attorno alla nostra stella su orbite ellittiche, di cui il Sole occupa uno dei fuochi. Durante il movimento dei pianeti, pertanto, la loro distanza dal Sole non è fissa (come sarebbe se l'orbita fosse circolare), ma varia continuamente, con punti di minima e massima distanza. Per la Terra, questi due punti si chiamano, rispettivamente, *perielio* e *afelio* e corrispondono alle distanze di circa 147 milioni e 152 milioni di chilometri. Per qualsiasi altro corpo celeste (pianeta o stella), la minima e la massima distanza

dal Sole sono dette, rispettivamente, *periastro* e *apoaastro*.

Una domanda da porre agli alunni, e che comporta diverse implicazioni interessanti, è la seguente: in estate la Terra si trova al perielio o all'afelio? Contrariamente a quanto si possa pensare, la Terra è più vicina al Sole in inverno che in estate. Le stagioni sono infatti la conseguenza dell'inclinazione dell'asse terrestre sull'eclittica (e non della distanza della Terra dal Sole), che durante il movimento di rivoluzione annuale porta il nostro pianeta a ricevere una maggiore quantità di illuminazione d'estate piuttosto che d'inverno. Ma c'è un'altra considerazione importante da fare, che tira in ballo i due emisferi della Terra, quello settentrionale (o boreale), alle nostre latitudini, e quello meridionale (o australe), per i quali le stagioni durante l'anno si invertono, l'estate da una parte, per es., corrispondendo all'inverno dall'altra.

Questo fatto è un'ulteriore conferma che le stagioni non dipendono dalla distanza della Terra dal Sole e potrebbe trarre maggiormente in inganno uno studente dell'emisfero australe, per il quale l'estate corrisponde al periodo dell'anno durante il quale la Terra è più vicina al Sole.

La seconda legge di Keplero riguarda la velocità con la quale i pianeti si muovono durante la loro orbita attorno al Sole e stabilisce che ogni pianeta si muove in modo tale che il raggio vettore che lo congiunge al Sole spazza aree uguali in tempi uguali (*fig.8*).

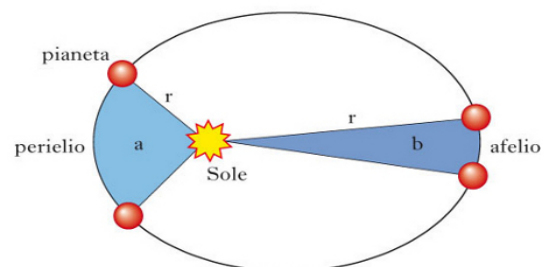


fig.8 Seconda legge di Keplero: le aree *a* e *b*, spazzate dal raggio vettore *r* che descrive istante per istante la posizione di un pianeta in orbita attorno al Sole, sono proporzionali ai tempi impiegati a percorrerle, ossia sono fra loro uguali così come uguali sono i tempi impiegati dal pianeta a percorrere i due archi di ellisse corrispondenti; questo implica che la velocità orbitale al perielio viene a essere maggiore rispetto a quella posseduta all'afelio

La conseguenza di questa legge è che la velocità di rivoluzione dei pianeti attorno al Sole, compresa la Terra, non è costante, ma varia di giorno in giorno. Ciò che è sempre la stessa è invece l'area coperta dal raggio vettore durante la rivoluzione annuale e ciò fa sì che ogni pianeta, in un uguale intervallo di tempo, deve percorrere un arco minore quanto più vicino è all'afelio, per cui la velocità è minore all'afelio e maggiore al perielio. Per comprendere questo fatto facciamo uso di semplici considerazioni di geometria elementare applicate alla rivoluzione del pianeta illustrata dalla *fig.8*. Date le distanze in gioco, possiamo considerare le due aree a e b approssimativamente come quelle di due triangoli. Ipotizziamo che quando il pianeta si trova all'afelio la sua distanza dal Sole sia doppia rispetto a quella al perielio e che il tempo impiegato dal pianeta per percorrere l'orbita corrispondente alle due aree a e b sia lo stesso. Poiché le aree a e b dei due triangoli sono uguali e l'altezza all'afelio è doppia rispetto a quella al perielio, la base del triangolo corrispondente all'area a deve essere il doppio della base del triangolo corrispondente all'area b . Dunque, se il pianeta impiega lo stesso tempo per coprire la distanza corrispondente alle due basi, poiché quella vicino al perielio è il doppio dell'altra, la velocità vicino al perielio deve essere il doppio di quella vicino all'afelio. Seguendo questo ragionamento, per generiche aree uguali corrispondenti a generici triangoli caratterizzati da altezze e basi intermedie rispetto a quelle dell'esempio appena descritto, il rapporto tra le basi al perielio e all'afelio corrisponde dunque a quello tra le velocità lungo l'orbita negli stessi punti. La terza legge di Keplero mette in relazione la distanza di un pianeta dal Sole con il tempo che il pianeta impiega per percorrere l'intera orbita, stabilendo che il rapporto tra i quadrati dei tempi di rivoluzione e il cubo della loro distanza media dal Sole è costante, ossia la velocità media di rivoluzione di un pianeta è tanto minore quanto più esso è lontano dal Sole, come già indicato dalla seconda legge. Le leggi Keplero, originariamente descritte per descrivere il movimento dei pianeti, sono valide anche per descrivere quello di un corpo in orbita rispetto a un altro, a condizione che la massa del corpo orbitante sia trascurabile rispetto a quella del corpo centrale e che sia trascurabile anche l'interazione tra i due corpi. Così, tali leggi si applicano per ogni rivoluzione planetaria o galattica, quindi anche, per esempio, al movimento dei satelliti attorno alla Terra o a quello della Luna attorno al nostro pianeta. In generale, la rivoluzione va intesa rispetto al centro di massa dei corpi che costituiscono il sistema, definito come il punto nel quale si può considerare concentrata la massa totale del sistema stesso e al quale sia applicata la risultante delle forze esterne che agiscono sul sistema; nel caso del sistema pianeta-Sole, il centro di massa coincide praticamente con il centro del Sole. Le stelle di una galassia orbitano attorno al suo centro di massa nello stesso modo in cui i pianeti orbitano attorno al Sole, il movimento essendo regolato dalle leggi di Keplero.

Destino finale

Grazie alle simulazioni numeriche effettuate al computer si possono predire con grande precisione le orbite dei pianeti del Sistema solare per i prossimi dieci milioni di anni e stimare quale sarà l'evoluzione del sistema entro cinque miliardi di anni. I risultati delle simulazioni indicano che il Sistema solare si manterrà sostanzialmente stabile, con variazioni contenute che riguardano soltanto le orbite dei pianeti terrestri. La maggiore instabilità riguarda l'orbita di Mercurio, che non si esclude possa entrare in collisione con Venere fra meno di tre miliardi e mezzo di anni, mentre non c'è pericolo di contatto per tutti gli altri pianeti. Un drastico cambiamento si avrà tra circa cinque miliardi di anni, quando si esaurirà il combustibile nucleare, ossia l'idrogeno, che brucia all'interno del Sole facendolo splendere e la nostra stella comincerà a evolvere verso lo stadio di gigante rossa (vedi ancora lezione sull'[Evoluzione stellare](#)). La fornace interna tenderà allora a spegnersi e i gas sovrastanti crolleranno verso il centro, facendo aumentare enormemente la pressione. Ciò porterà la temperatura fino a 100 milioni di gradi. A

questo punto il Sole userà come combustibile l'elio, precedentemente prodotto dal bruciamento dell'idrogeno, e il nuovo prodotto della combustione sarà il carbonio. Queste reazioni interne faranno espandere enormemente il Sole e il futuro del Sistema solare, e soprattutto del nostro pianeta, non sarà dei più rosei.

Il Sole arriverà dapprima a inghiottire le orbite di Mercurio e di Venere e dalla Terra apparirà come un enorme astro rossastro che occuperà più di un terzo di cielo (*fig.9*) e si espanderà sempre più, fino a che anche la Terra sarà raggiunta dal fuoco solare.



Fig.9 Rappresentazione artistica dell'evoluzione del Sole verso lo stadio di gigante rossa

Successivamente, quando anche l'elio sarà esaurito, si verificherà un nuovo crollo degli strati esterni del Sole verso il centro, con un conseguente aumento della temperatura fino a 600 milioni di gradi, che avvierà le condizioni per bruciare il carbonio producendo ossigeno. Le reazioni termonucleari produrranno ogni volta una gigantesca esplosione, con espulsione verso lo spazio degli strati esterni. Poiché il Sole è troppo piccolo per raggiungere al suo interno valori di pressione e di temperatura tali da far proseguire ulteriormente le reazioni nucleari fino alla produzione di elementi più pesanti e a diventare, una volta esaurite tutte le reazioni, una *supernova*, dopo il bruciamento del carbonio diventerà una piccola stella estremamente compatta e luminosa, molto densa, che continuerà a brillare per milioni di anni, affievolendosi sempre più.