

Il Sistema Solare: origine e caratteristiche

Le leggi matematiche del moto dei pianeti

Per poter comprendere l'origine e l'evoluzione del Sistema Solare è necessario sapere qualcosa sul modo in cui i pianeti si muovono lungo le loro orbite. Le leggi del moto orbitale sono state scoperte agli inizi del Seicento da Johannes Kepler (1571-1630) sulla base di una serie di osservazioni delle posizioni dei pianeti eseguite da Tycho Brahe (1546-1601) per mezzo di strumenti di misura molto precisi. Forse questo è il primo dei tanti casi in cui un progresso importante nella comprensione della natura è stato reso possibile da uno sviluppo tecnologico: se Keplero non avesse avuto a disposizione osservazioni così precise, non gli sarebbe stato possibile distinguere tra le varie forme di orbita possibile e arrivare alla formulazione delle sue tre leggi.

La prima legge di Keplero descrive la forma dell'orbita dei pianeti, e dice che *le orbite dei pianeti sono ellissi, di cui il Sole occupa uno dei fuochi*. L'ellisse è la figura ovale che può essere descritta come un cerchio schiacciato (ad esempio un cerchio osservato in direzione obliqua appare come un'ellisse, per effetto della prospettiva); ha due assi di simmetria che si intersecano ad angolo retto nel centro della figura, e corrispondono alle direzioni in cui l'ovale è più lungo (*asse maggiore*) e più corto (*asse minore*). Il Sole non si trova nel centro dell'ellisse, ma in uno dei *fuochi*, due punti posti sull'asse maggiore, a uguale distanza dal centro, e che hanno una proprietà geometrica particolare: se si sommano le distanze dai due fuochi di un qualsiasi punto dell'ellisse, si ottiene sempre lo stesso valore (figura 1). Questo è anche uno dei modi di definire geometricamente l'ellisse e di tracciarla (usando ad esempio due pioli e una corda, la cosiddetta *costruzione del giardiniere*). Indirettamente, la prima legge di Keplero dice anche che le orbite si svolgono in un piano (che contiene anche il Sole) e che sono chiuse, cioè ad ogni rivoluzione il pianeta percorre lo stesso percorso della rivoluzione precedente. Il fatto che il Sole si trovi in uno dei fuochi e non nel centro comporta che la distanza del pianeta dal Sole varia nel corso della sua rivoluzione, passando da un valore minimo (nel punto dell'orbita chiama-

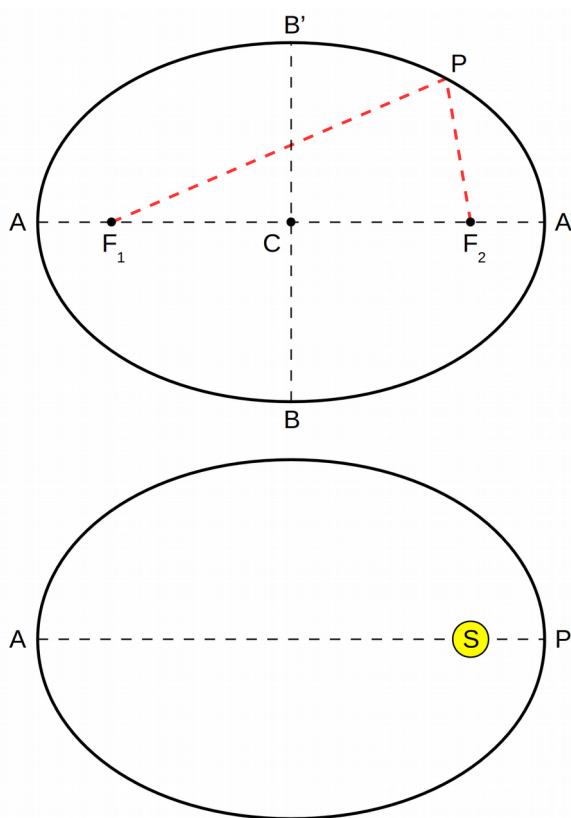


Figura 1: (In alto) L'ellisse possiede due assi di simmetria ortogonali tra di loro: l'asse maggiore (AA') e l'asse minore (BB'), che si intersecano nel centro della figura (C). I due fuochi F₁ ed F₂ sono disposti sull'asse maggiore in posizione simmetrica rispetto al centro. Per qualsiasi punto dell'ellisse P la somma delle distanze dai fuochi ha sempre lo stesso valore, pari alla lunghezza dell'asse maggiore: $\overline{PF_1} + \overline{PF_2} = \overline{AA'}$. (In basso) In un'orbita ellittica il Sole (S) occupa uno dei due fuochi: la distanza del pianeta dal Sole varia da un minimo, quando il pianeta è al perielio (P) a un massimo, quando è all'afelio (A).

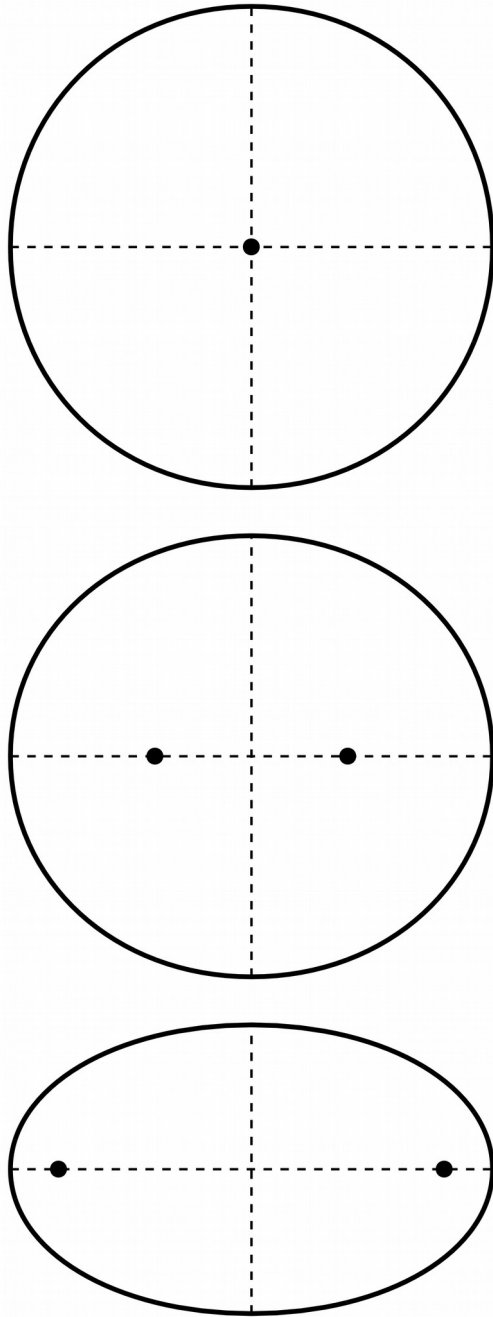


Figura 2: Tre ellissi aventi lo stesso lo stesso semi-asse maggiore ($a=1$) ed eccentricità e crescenti dall'alto verso il basso; i due punti neri sull'asse maggiore individuano le posizioni dei due fuochi. *In alto*: un'ellisse con eccentricità $e=0$; i due fuochi sono coincidenti con il centro della figura, che si riduce a un cerchio. *Al centro*: un'ellisse con eccentricità $e=0.4$; la lunghezza del semi-asse minore vale $b=0.92$. *In basso*: un'ellisse con eccentricità $e=0.8$ ($b=0.6$).

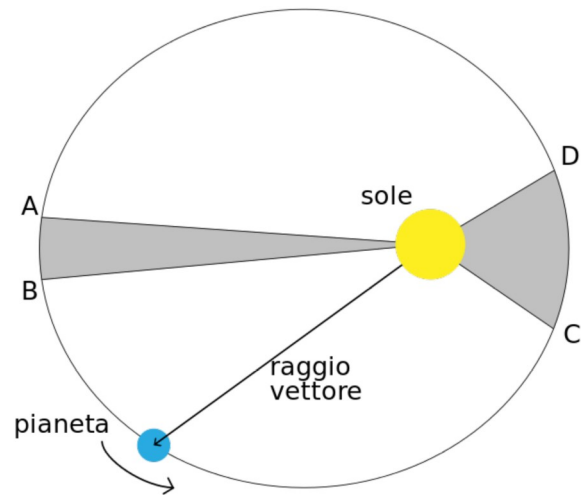


Figura 3: Illustrazione della seconda legge di Keplero (legge delle aree): poiché l'area del triangolo ASB è uguale a quella del triangolo CSD, il pianeta impiega lo stesso tempo per percorrere i tratti dell'orbita AB e CD.

to *perielio*) a un massimo (all'*afelio*). L'allungamento dell'ellisse è misurato da un parametro chiamato *eccentricità*, che può assumere valori compresi tra zero (i due assi hanno lunghezza uguale e quindi l'ellisse si riduce a un cerchio) e uno (il caso limite in cui l'asse minore ha lunghezza nulla e l'ellisse degenera in un segmento). È importante notare che quanto maggiore è l'eccentricità di un'ellisse (cioè il suo "schiacciamento"), tanto maggiore è la distanza dei fuochi dal centro, e quindi tanto maggiori saranno le variazioni della distanza del pianeta dal Sole nel corso dell'orbita. Al contrario, in un'ellisse di eccentricità nulla (cioè un cerchio) i due fuochi coincidono con il centro, e la distanza del pianeta dal Sole rimane costante (figura 2).

La seconda legge di Keplero enuncia la *legge oraria* del moto dei pianeti, cioè descrive quali posizioni un pianeta assume in istanti di tempo successivi; essa afferma che *un pianeta si muove lungo la propria orbita in modo che il raggio vettore spazza aree uguali in tempi uguali*. In altre parole: muovendosi lungo l'orbita il pianeta non ha sempre la stessa velocità lineare (distanza percorsa per unità di tempo) e neppure la stessa velo-

cità angolare (angolo percorso per unità di tempo) ma segue una legge più complicata. Il *raggio vettore* citato nella legge è il segmento immaginario che congiunge il pianeta con il Sole. La legge afferma che l'area che tale segmento spazza nel corso del moto è proporzionale al tempo trascorso. Ad esempio, facendo riferimento alla figura 3, se l'area del settore di ellisse

ASB è uguale a quella del settore CSD, secondo la seconda legge il pianeta impiega lo stesso tempo per percorrere i due tratti di orbita AB e CD. Una conseguenza della seconda legge è che la velocità orbitale del pianeta è tanto maggiore quanto più il pianeta è vicino al Sole; in particolare, la velocità è massima al perielio e minima all'afelio.

Ogni pianeta impiega sempre lo stesso tempo per compiere una rivoluzione completa attorno al Sole. Questo intervallo di tempo (chiamato *periodo orbitale*) è però differente per ogni pianeta. La terza legge di Keplero stabilisce una relazione tra il periodo orbitale e la dimensione dell'orbita, e stabilisce che *i quadrati dei periodi orbitali dei pianeti sono proporzionali ai cubi degli assi maggiori delle loro orbite*. In altre parole, se si considera una qualsiasi coppia di pianeti, il rapporto tra i quadrati del loro periodo orbitale è uguale al rapporto tra i cubi dei corrispondenti assi maggiori.

La fisica del moto dei pianeti

Le leggi di Keplero sono state un importante progresso non solo perché descrivevano il moto dei pianeti con una precisione molto maggiore di tutte le teorie precedenti, ma anche perché si ponevano da un nuovo punto di vista: il pianeta non era più visto come un punto luminoso sulla superficie della volta celeste, ma come un corpo fisico che si muove nello spazio. Questo modo di considerare i corpi celesti si era andato affermando progressivamente a partire dalla fine del Medioevo, e Keplero per la prima volta lo pone alle basi di una teoria matematica del moto. Keplero fu anche il primo a cercare una *spiegazione fisica* delle cause di questi movimenti, sulla base di un'influenza esercitata dal Sole sui pianeti: in questo compito fallì, perché la fisica su cui si basava era ancora quella della tradizione aristotelica e medioevale, ed era pertanto inadeguata. Agli inizi del Seicento gli studi di Galileo Galilei posero le basi di una nuova comprensione delle leggi che governano il moto degli oggetti materiali; a partire da queste, Isaac Newton elaborò una teoria matematica della dinamica che, se si trascurano le correzioni apportate dalla relatività, rimane valida ancora oggi. Newton dimostrò che il moto dei pianeti può essere spiegato completamente partendo da due soli postulati: a) tutti i corpi materiali si attraggono con una forza proporzionale alla loro massa e inversamente proporzionale alla loro distanza (la *legge di gravitazione universale*) e b) tutte le forze producono un'accelerazione nel moto dei corpi secondo la legge fondamentale della dinamica $F = ma$, che comprende come caso particolare il principio di inerzia. Newton dimostrò che le tre leggi di Keplero sono una conseguenza diretta di questi due principi; la catena di deduzioni che dimostra questa connessione richiede un tipo di matematica molto complessa che all'epoca non esisteva, e che Newton e Leibniz svilupparono appositamente per risolvere questo problema: è il ramo della matematica che oggi chiamiamo *calcolo differenziale e integrale*. La deduzione di Newton è valida rigorosamente solo nelle condizioni del cosiddetto problema dei due corpi, cioè nel caso in cui il pianeta sia sottoposto all'attrazione gravitazionale di un solo corpo (il Sole). Nel Sistema Solare reale questa condizione si verifica solo in modo approssimato in quanti i pianeti, oltre a essere attratti dal Sole, si attraggono anche tra di loro, anche se questo è un effetto molto più piccolo (il pianeta più grande del Sistema Solare, Giove, ha una massa che è solo un millesimo di quella del Sole). Se si tiene conto anche di queste perturbazioni la traiettoria dei pianeti non è più esattamente ellittica, anche se può essere descritta come un'ellisse la cui forma cambia progressivamente nel tempo; la soluzione delle equazioni del moto diventa molto più complessa, e diverse generazioni di matematici nel corso del Settecento si sono applicati a trovare metodi di calcolo che potessero fornire previsioni sempre più accurate.

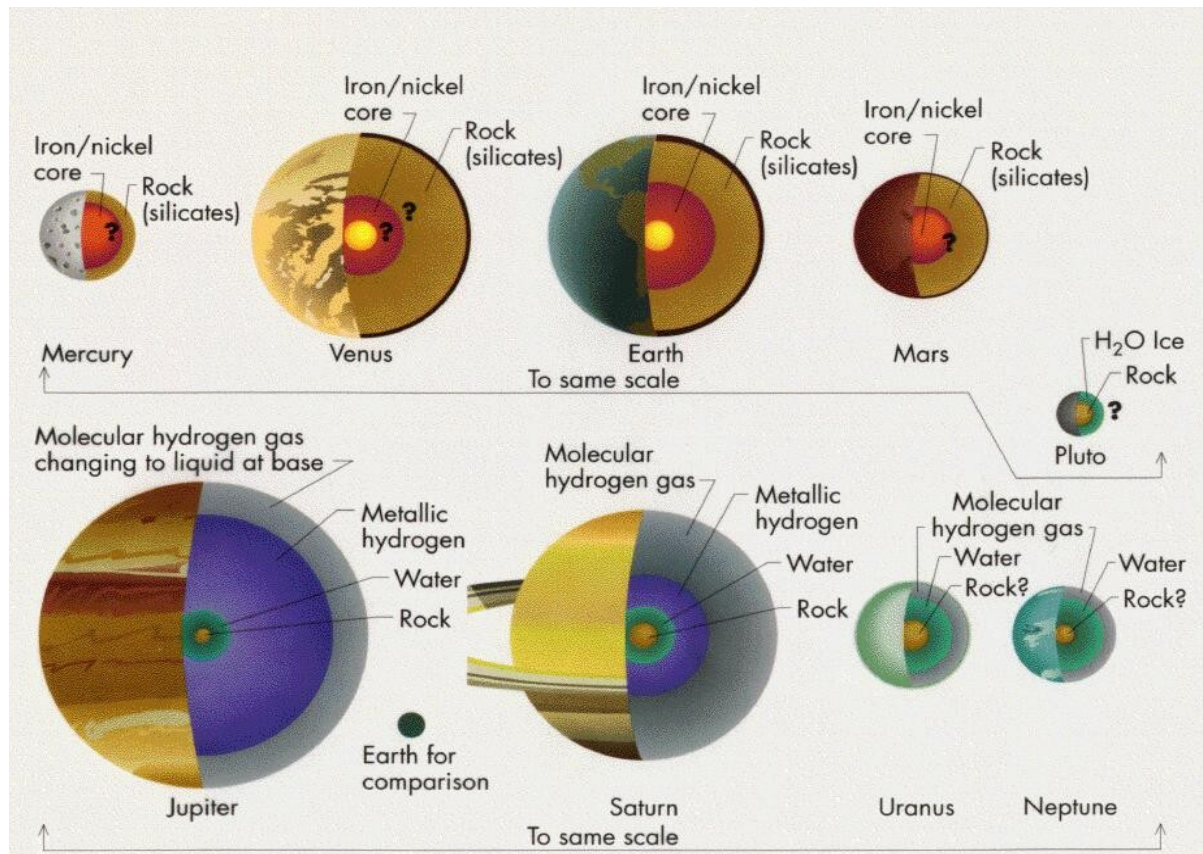


Figura 4: Modelli presunti della struttura interna dei pianeti interni (*in alto*) ed esterni o giganti (*in basso*).

Le leggi della dinamica permettono di prevedere che l'ellisse non è l'unica forma di orbita possibile nel caso del problema dei due corpi: esistono anche traiettorie di forma parabolica e iperbolica. Queste corrispondono a moti non periodici e non legati al corpo perturbatore: sono le traiettorie percorse da un oggetto che si avvicina provenendo dalle profondità dello spazio e ad esse ritorna, dopo un incontro ravvicinato con un oggetto dotato di massa che ne deflette il moto rettilineo uniforme; sono insomma le traiettorie che descrivono gli incontri ravvicinati tra corpi celesti.

Il motivo per cui un pianeta segue un'orbita piuttosto che un'altra (un'ellisse con un certo semiasse maggiore e una certa eccentricità oppure una parabola o un'iperbole) è legato alle condizioni iniziali del moto: la forma e le dimensioni dell'orbita dipendono direttamente dalla posizione e dalla velocità iniziale del pianeta; nel caso del Sistema Solare esse sono quindi determinate dal processo di formazione dei pianeti.

La struttura attuale del Sistema Solare

Nel Sistema Solare attuale le orbite dei pianeti principali sono ellissi poco allungate (le eccentricità sono inferiori al 10%, tranne per Mercurio, che ha un'eccentricità del 20%), ben spaziate tra di loro e quasi complanari (con inclinazioni reciproche di pochi gradi). Questa struttura discoidale deriva dal meccanismo con cui il Sistema Solare si è formato e gli garantisce una grande stabilità: nel corso del loro moto orbitale i pianeti non si possono avvicinare troppo tra di loro, condizione questa che produrrebbe forti perturbazioni gravitazionali e causerebbe un veloce cambiamento delle orbite.



Figura 5: Particolare della nube molecolare gigante NGC 6188, nella costellazione australe dell'Ara, che si trova a circa 4000 anni luce dalla Terra.

Il Sistema Solare può essere suddiviso in senso concentrico in due regioni principali. Il Sistema Solare interno è formato dai pianeti da Mercurio a Marte, che hanno piccole dimensioni (il più grande di essi è la Terra) e composizione essenzialmente rocciosa, dominata dai silicati, e con nuclei composti da ferro: la loro densità media è quindi piuttosto elevata ($4\text{-}5\text{ g/cm}^3$). Il Sistema Solare esterno comprende i pianeti da Giove a Nettuno, chiamati anche *pianeti giganti* perché sono molto più grandi dei pianeti interni (Giove ha una massa più di 300 volte superiore a quella della Terra). I pianeti giganti possiedono un piccolo nucleo roccioso ma sono costituiti per la maggior parte da elementi leggeri (soprattutto idrogeno); per questo la loro densità è molto bassa, attorno a 1 g/cm^3 (figura 4).

Oltre ai pianeti principali il Sistema Solare contiene una grande quantità di *corpi minori*: i satelliti dei pianeti, che compiono le loro orbite attorno ai pianeti principali, e gli *asteroidi* o pianetini, piccoli corpi di natura rocciosa che, come i pianeti, si muovono attorno al Sole. La maggior parte degli asteroidi occupano due regioni relativamente stabili: la *fascia principale degli asteroidi*, una zona a forma di anello compresa tra le orbite di Marte e di Giove, e il gruppo dei troiani, un insieme di pianetini che percorre la stessa orbita di Giove, mantenendo-

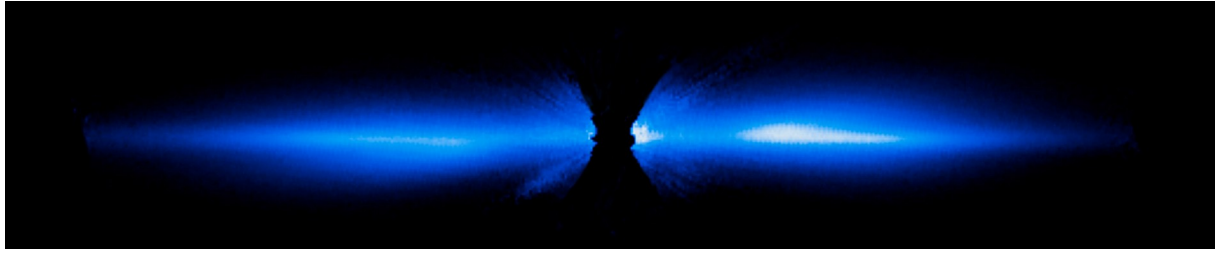


Figura 6: Immagine del disco di polveri attorno alla stella β Pictoris, visibile quasi perfettamente di taglio, che si pensa possa essere un sistema planetario in corso di formazione, simile al disco da cui si è formato il nostro Sistema Solare quattro miliardi e mezzo di anni fa. L'immagine è ripresa con il telescopio spaziale Hubble: la macchia nera a forma di farfalla al centro della fotografia è un diaframma opaco posto sul piano focale del telescopio per nascondere la stella centrale, che con la sua intensa luminosità impedirebbe la visione della debole luminosità del disco.

si però a una distanza di circa 60° davanti o dietro il pianeta gigante ed evitando in questo modo incontri troppo ravvicinati con esso. Da queste regioni fuoriescono sporadicamente asteroidi che si dispongono su orbite allungate, che incrociano le orbite dei pianeti principali: sono orbite instabili, fortemente perturbate dagli incontri ravvicinati con i pianeti, e che evolvono rapidamente, terminando di solito con l'eliminazione del pianettino, che collide con il Sole o con uno dei pianeti principali oppure è espulso dal Sistema Solare su un'orbita iperbolica. Questi sono gli oggetti responsabili della formazione dei crateri da impatto che abbondano sulle superfici di tutti i pianeti interni del Sistema Solare e che sono visibili particolarmente sui corpi privi di atmosfera (come Mercurio e la Luna). Tra questi, gli oggetti che hanno orbite che incrociano quella della Terra sono chiamati *NEO* (*Near Earth Asteroids*).

Agli estremi limiti del Sistema Solare, oltre l'orbita di Nettuno, si trova un'altra regione densamente popolata da piccoli corpi composti in gran parte da ghiaccio d'acqua, misto a piccole quantità di polvere e materiale roccioso (“neve sporca”, secondo l'efficace definizione di un astronomo): è la *fascia di Kuiper* o degli *oggetti trans-nettuniani*, che sono i progenitori delle comete. Può infatti accadere che uno di questi oggetti venga espulso dalla fascia di Kuiper, per effetto di perturbazioni gravitazionali o di collisioni, e venga immesso in un'orbita fortemente allungata, che lo porta periodicamente nelle vicinanze del Sole. In questo caso la radiazione solare fa sublimare il ghiaccio dalla superficie del corpo, creando attorno ad esso un alone di gas ionizzato (la chioma della cometa) e provocando l'espulsione di una parte della polvere che il ghiaccio conteneva (formando la coda).

La formazione del Sistema Solare

Il Sistema Solare fa parte della Via Lattea, una galassia che contiene, oltre ad alcune centinaia di miliardi di stelle, una grande quantità di gas e di polveri. Parte di questo materiale è condensato in strutture chiamate nubi molecolari giganti: *molecolari* perché la loro temperatura estremamente bassa fa sì che il gas in esse contenuto (principalmente idrogeno) sia in forma molecolare (H_2); *giganti* perché la loro massa è molto grande, da parecchie migliaia a milioni di masse solari (figura 5). Si pensa che il Sistema Solare (e, in generale, le stelle e i sistemi planetari) si sia formato dalla condensazione di una di queste nubi. Una nube molecolare gigante è in una condizione di equilibrio instabile tra due forze contrapposte: la gravità, che tende a far contrarre la nube, e la pressione interna del gas, che tende a farla espandere. Se, per qualsiasi motivo, la densità del gas supera un certo valore critico, la gravità prende il sopravvento sulla pressione e la nube inizia a contrarsi. Inizialmente la nube ha una velocità di rotazione molto bassa, ereditata dalla rotazione generale della galassia, ma nel corso della contra-

zione la rotazione diventa sempre più rapida a causa di una legge generale della fisica (la conservazione del momento angolare). Nel corso della contrazione la nube si suddivide in frazioni più piccole, di massa comparabile a quella di una stella, che continuano a contrarsi e a ruotare sempre più rapidamente, fino a che la forza centrifuga generata dalla rotazione controbilancia la forza di attrazione: al centro della nube si forma una grossa condensazione (la protostella), mentre il resto della materia si dispone in una struttura a forma di disco, in cui ogni particella percorre un'orbita approssimativamente circolare attorno alla massa centrale (figura 6).

La composizione chimica della nube rispecchia la composizione media della materia nell'Universo: essa è formata in massima parte da gas leggeri, soprattutto idrogeno (74%) ed elio (24%); solo una piccola percentuale (meno del 2%) è fatta da elementi più pesanti (carbonio, azoto, ossigeno, ecc.). Gli elementi non volatili formano anche granelli di polvere, che inizialmente hanno dimensioni molto piccole (dell'ordine del millesimo di millimetro) ma che con il tempo tendono a coagularsi, per effetto di forze di adesione elettro-chimiche, fino a formare corpuscoli sempre più grandi; è lo stesso meccanismo per cui la polvere, sui pavimenti delle nostre case, tende a unirsi in batuffoli. In questa fase l'accrescimento dei *planetesimi* (i piccoli corpi solidi che costituiscono i germi dei futuri pianeti) è favorito dal fatto che le orbite all'interno della nube sono molto ordinate (circolari e complanari), per cui le collisioni tra oggetti avvengono a velocità relativa molto modesta. Quando i planetesimi raggiungono dimensioni dell'ordine del chilometro, la loro attrazione gravitazionale comincia a farsi sentire, ed essi si accrescono più velocemente; si instaura una specie di competizione per cui gli oggetti più grandi tendono a diventare sempre più grandi, a spese di quelli più piccoli. Le perturbazioni gravitazionali reciproche aumentano anche le eccentricità e le inclinazioni dei planetesimi, e quindi le loro velocità relative: in queste condizioni gli urti diventano molto più energetici, e provocano la frammentazione dei corpi coinvolti invece che l'accrescimento. Alla fine rimane solo un numero ridotto di corpi di grandi dimensioni: tra questi, quelli che hanno orbite instabili (che incrociano le orbite degli altri pianeti) vengono progressivamente distrutti dalle collisioni o espulsi dal Sistema Solare, per cui gli unici pianeti destinati a sopravvivere sono quelli su orbite stabili, sufficientemente distanziate tra di loro.

Nel frattempo la parte centrale della nube ha continuato a contrarsi in un unico grande corpo di forma sferica. L'aumento della densità e della pressione provocano un aumento della temperatura fino ad alcuni milioni di gradi. In queste condizioni gli urti tra le particelle che costituiscono il gas sono così energetici che si innescano reazioni termonucleari che, fondendo nuclei di idrogeno in nuclei di elio, liberano un'enorme quantità di energia: è nata una nuova stella. La pressione di radiazione prodotta dalle reazioni nucleari è così forte da controbilanciare l'attrazione gravitazionale: la stella raggiunge quindi una condizione di equilibrio che manterrà per milioni o miliardi di anni, fino a quando non avrà esaurito la sua dotazione di idrogeno. Le fasi iniziali della vita di una stella sono piuttosto turbolente: in questa fase (chiamata *T Tauri*) l'astro emette un forte flusso di particelle, che spazzano via dal disco i residui di gas e polveri rimasti dopo l'accrescimento dei pianeti.

Il fatto che le fasi finali dell'accrescimento dei pianeti avvengano quando il Sole ha già cominciato a brillare spiega le differenze di composizione e di dimensioni tra i pianeti interni e quelli esterni. Nelle regioni più vicine al Sole il gas è riscaldato dal calore emesso dal Sole. Come è noto, la temperatura di una sostanza è indice dell'agitazione delle molecole che la compongono. Nelle regioni prossime al Sole gli atomi degli elementi più leggeri (l'idrogeno e l'elio che, come abbiamo visto, costituiscono il 98% della materia disponibile) hanno velocità così elevate da non poter essere trattiene dalla gravità dei pianeti che si stanno formando; questi si accrescono utilizzando solo gli elementi più pesanti, e quindi sono densi ma piccoli.

Al contrario, oltre un certo limite di distanza (che si trova approssimativamente tra l'orbita di Marte e quella di Giove) la temperatura è sufficientemente bassa perché i pianeti possano trattenere l'idrogeno e l'elio nella propria atmosfera, dando origine a corpi giganti e gassosi.