

1 - LA TERRA NEL SISTEMA SOLARE

1.1 - Osservando il cielo

In una notte limpida e senza Luna, in una località con un vasto orizzonte e in assenza di luci artificiali, il cielo appare come una volta punteggiata di stelle, come se la Terra si trovasse al centro di una grande **sfera celeste**. Gli antichi credevano a una sfera di cristallo nella quale erano conficcate le stelle. Ancora oggi si continua a parlare di sfera celeste, semplificazione utile per descrivere le posizioni degli astri nel cielo e i loro moti. Guardando il cielo in diverse ore della notte, si osserva che le stelle appaiono in moto da Est ad Ovest, *pur mantenendo le stesse posizioni relative*; sembra che la sfera celeste ruoti attorno ad un asse ideale passante per il centro della Terra e puntato nella direzione della **Stella Polare**. La velocità angolare di rotazione è pari a 15 gradi/ora, cioè 360 gradi in un giorno completo: la sfera celeste compie una rotazione intera in 24 ore (**fig. 1.1**).

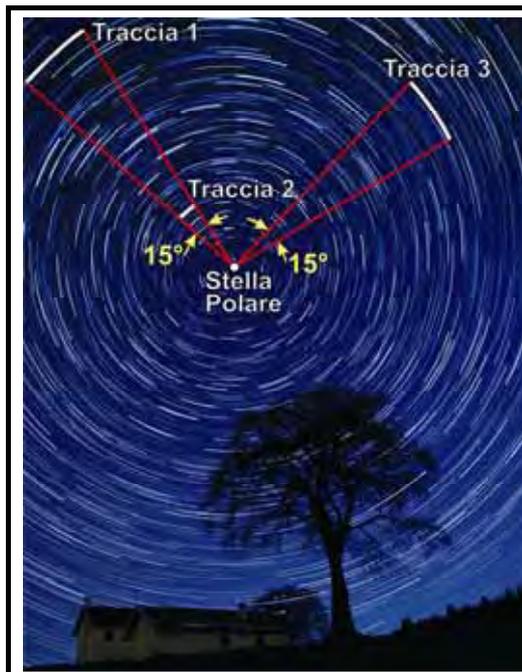


Fig. 1.1 - La fotografia delle tracce stellari si basa sull'apparente movimento della volta celeste intorno ad un punto molto prossimo alla Stella Polare.

Utilizzando una fotocamera solidale alla Terra, è possibile registrare le tracce che testimoniano il movimento apparente delle stelle.

In questa immagine l'otturatore della fotocamera, con l'asse dell'obiettivo puntato sulla Stella Polare, è rimasto aperto per un'ora. Sono evidenziate tre tracce (1, 2 e 3) per meglio evidenziare la loro forma ad arco sotteso allo stesso angolo.

Le stelle, sul fotogramma, hanno tracciato brevi tratti corrispondenti ad $1/24$ dell'intero intervallo di un giorno, quindi un angolo pari alla stessa frazione dell'angolo giro cioè $1/24$ di $360^\circ = 15^\circ$.

Tutte le stelle, mantenendo le stesse posizioni reciproche, si sono mosse lungo tracciati "tutti" corrispondenti al tempo di un'ora e quindi alla velocità angolare di $15^\circ/\text{ora}$.

Da un determinato punto della superficie terrestre è visibile soltanto una metà della sfera celeste; l'altra è sotto la linea dell'orizzonte, nascosta dalla Terra stessa, ma visibile, nello stesso istante, agli antipodi (l'estremità opposta del globo). Il punto che la Stella Polare occupa sulla sfera celeste è il **Polo Nord Celeste**, mentre quello opposto è il **Polo Sud Celeste**. L'asse congiungente i due poli è l'**asse del mondo** ed intorno ad esso la sfera celeste sembra ruotare. L'**equatore celeste** è il cerchio definito dall'intersezione della sfera celeste con il piano passante per il centro (la Terra) e perpendicolare all'asse del mondo (**fig. 1.2**).

In un determinato istante e in una data posizione sulla superficie terrestre, volgendo lo sguardo sulla verticale, si individua un punto sulla sfera celeste detto **zenit** (all'estremità opposta è il **nadir**). Nello stesso istante, volgendo lo sguardo attorno, si ha la sensazione, se non vi sono ostacoli (case, montagne, alberi,...) di vedere il confine fra la semisfera celeste visibile e l'orizzonte; questo è l'**orizzonte astronomico**, definito geometricamente dall'intersezione della sfera celeste con un piano passante per il punto di osservazione e perpendicolare all'asse congiungente zenit e nadir. Se allo zenit del punto di osservazione si trova la Stella Polare, zenit, nadir e orizzonte astronomico coincidono rispettivamente con Polo Nord, Polo Sud ed equatore celesti; altrimenti per un qualunque altro punto di osservazione si ha la situazione esemplificata in **fig. 1.3**.

Osservando il cielo anche a distanza di molti anni, si nota che le stelle mantengono identiche posizioni le une rispetto alle altre. Occorrerebbero migliaia di anni per verificare, ad occhio nudo, piccole differenze. È quindi possibile disegnare una carta del cielo e individuare, con precise coordinate, qualunque suo punto (**scheda 1.1**).

Ai poli le stelle sembrano ruotare in cerchi concentrici intorno all'asse di rotazione, sempre alte sull'orizzonte, senza mai tramontare. All'equatore invece le stelle sembrano compiere un semicerchio: sorgono, culminano e tramontano. Alle latitudini intermedie le stelle prossime a quella Polare (dette **circumpolari**) rimangono sempre sopra all'orizzonte, mentre quelle più distanti (**occidue**) spariscono sotto l'orizzonte astronomico per una frazione del giorno tanto maggiore quanto più distanti sono dal Polo Celeste (**fig. 1.4**).

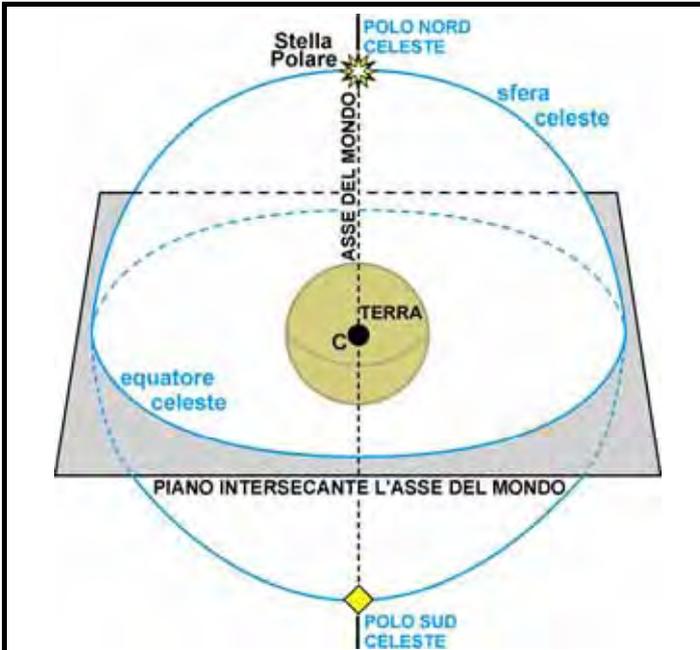


Fig. 1.2 - Il **Polo Nord Celeste** è un punto nella **sfera celeste** occupato dalla **Stella Polare**. All'opposto è il **Polo Sud Celeste**. L'**asse del mondo**, attorno al quale la sfera celeste sembra compiere un giro completo in 24 ore, congiunge i due poli passando per il centro (C) della Terra. Il **piano** perpendicolare all'asse e passante per C interseca la sfera dando origine all'**equatore celeste**.

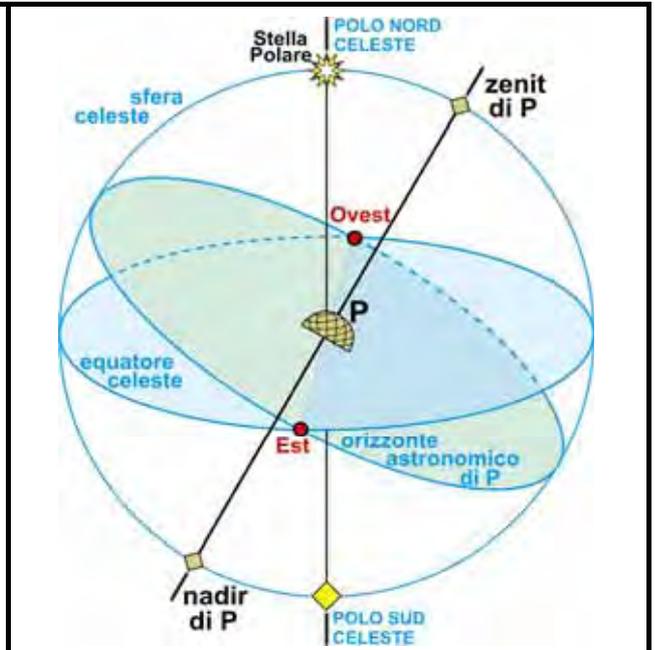


Fig. 1.3 - Lo **zenit** è un punto sulla sfera celeste sulla perpendicolare rispetto ad un punto di osservazione **P** sulla Terra. Il **nadir** è agli antipodi sulla **sfera celeste**. L'**orizzonte astronomico** del punto P rappresenta il limite al di sopra del quale si trova la mezza sfera celeste visibile (l'altra metà è nascosta dalla Terra). **Poli Nord** e **Sud** ed **Est** e **Ovest** sono detti **punti cardinali**.

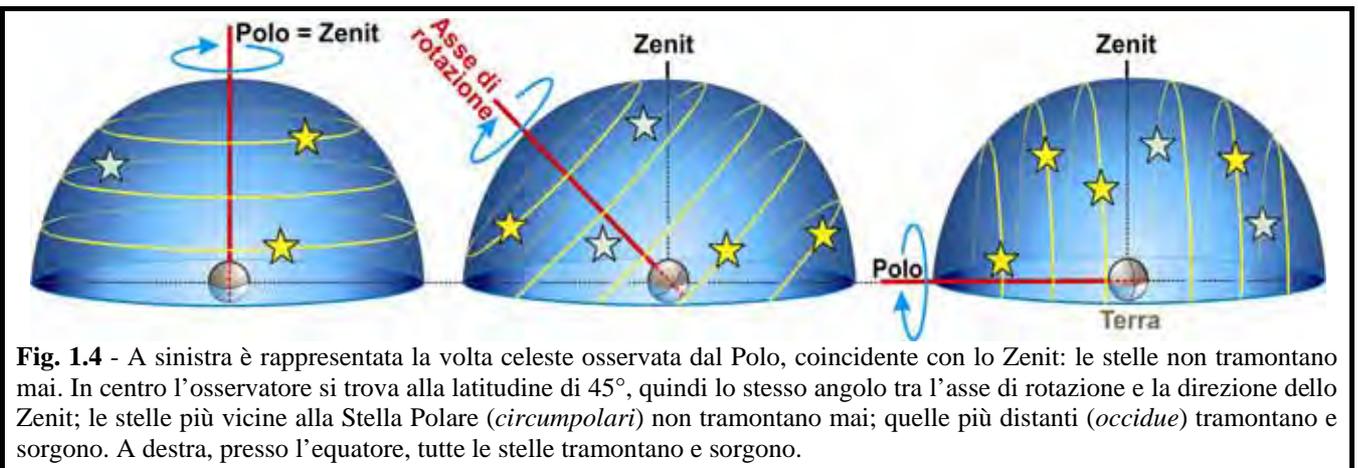


Fig. 1.4 - A sinistra è rappresentata la volta celeste osservata dal Polo, coincidente con lo Zenit: le stelle non tramontano mai. In centro l'osservatore si trova alla latitudine di 45°, quindi lo stesso angolo tra l'asse di rotazione e la direzione dello Zenit; le stelle più vicine alla Stella Polare (*circumpolari*) non tramontano mai; quelle più distanti (*occidue*) tramontano e sorgono. A destra, presso l'equatore, tutte le stelle tramontano e sorgono.

Fin dall'antichità ci si accorse che cinque "stelle" cambiano lentamente le loro posizioni rispetto alle altre. Esse vennero chiamate **pianeti** (dal greco antico: *errante*). Gli altri corpi celesti furono denominati, per distinzione, **stelle fisse**. Gli antichi greci diedero ai pianeti i nomi di alcune loro divinità: **Mercurio**, **Venere**, **Marte**, **Giove** e **Saturno**. Si deve all'invenzione del cannocchiale la scoperta di altri pianeti: **Urano** (nel 1781), **Nettuno** (1846) e **Plutone** (1930). Anche il Sole e la Luna potrebbero essere definiti "erranti", in quanto le loro posizioni cambiano rispetto alle stelle fisse.

1.2 - Il moto apparente dei corpi celesti

Le stelle, il Sole e la Luna sembrano descrivere cerchi completi attorno alla Terra in un giorno, mentre i pianeti sembrano compiere movimenti più complessi. I greci antichi, dai dati ottenuti dall'osservazione dei fenomeni celesti, tentarono di spiegare i movimenti degli astri partendo da alcune considerazioni:

- i moti degli astri devono essere spiegati con rigorose regole geometriche;
- gli astri hanno forma sferica ed i loro moti sono circolari ed uniformi;
- l'Universo è limitato nello spazio; in esso gli astri occupano posizioni definite.

L'esperienza suggeriva agli antichi che ogni corpo in movimento, non spinto da forze, è destinato a fermarsi. La materia era considerata come naturalmente portata alla quiete. Pertanto per spiegare il perdurare dei movimenti degli astri nel firmamento fu necessario invocare l'azione costante di un "motore esterno". Occorre aspettare il diciassettesimo secolo, con Galileo GALILEI (1564 - 1642) e Isaac NEWTON (1642 - 1727), per concepire l'idea secondo la quale un corpo, se non soggetto a forze, è in grado di conservare il suo stato di moto indefinitivamente. Se un oggetto non è ostacolato dall'attrito (come succede, nell'esperienza quotidiana, per i corpi sulla superficie terrestre), esso mantiene per sempre la stessa velocità. Un astro, nell'Universo "vuoto", non ostacolato da forze che lo rallentano, mantiene il suo moto senza bisogno di ricorrere all'idea di un "motore esterno".

Per capire il ragionamento seguito dai greci conviene citare i loro sistemi più famosi: EUDOSSO, ARISTARCO e TOLOMEO. Il fondatore della **cosmologia** (la scienza delle leggi generali dell'Universo) può essere considerato Eudosso di Cnido (409 - 356 a.C.), discepolo di Platone. Egli supponeva che i corpi celesti fossero disposti in una serie di sfere concentriche, ruotanti, con velocità diverse, intorno alla Terra. Per interpretare i movimenti del Sole, della Luna e dei pianeti, che si spostano in modo complesso rispetto alle stelle fisse, Eudosso ricorse ad un complicato principio di composizione di movimenti di più sfere. Aristarco (310 - 230 a.C.) collocò il Sole al centro del sistema, ammettendo un moto di rivoluzione annuale della Terra intorno allo stesso (sistema **eliocentrico**). A lui dobbiamo il primo tentativo scientifico di determinare le distanze del Sole e della Luna dalla Terra e le loro dimensioni relative. Pur nella approssimazione di quelle misure, notò che la Luna è più piccola della Terra ed il Sole molto più grande; pertanto ritenne improbabile che un corpo grande ruotasse intorno ad uno più piccolo. Sostenendo la quiete del Sole e che tutti gli altri pianeti, tra cui la Terra, ruotano in orbite circolari intorno al Sole stesso, si procurò l'accusa di empietà dai contemporanei. Tolomeo (127 - 150 d.C.), basandosi sulla notevole esperienza dell'importante Scuola di Alessandria d'Egitto, che da tempo tentava di spiegare matematicamente le irregolarità dei movimenti degli astri, formulò alcuni principi fondamentali (**fig. 1.5**):

- la Terra si trova, immobile, al centro dell'Universo e le stelle fisse sono sulla sfera celeste che ruota intorno ad un asse passante per i poli celesti, compiendo un giro ogni 24 ore;
- anche il Sole e la Luna ruotano attorno alla Terra secondo circonferenze, ma il loro centro non coincide con quello della Terra stessa;
- i pianeti si muovono lungo circonferenze (**epicicli**) i cui centri non sono fissi, ma percorrono anch'essi circonferenze (**deferenti**) con la Terra al loro interno e in posizione eccentrica rispetto a quest'ultima.

Nel **sistema tolemaico**, procedendo dal centro verso la periferia, i corpi celesti sono disposti nel seguente ordine: Terra, Luna, Mercurio, Venere, Sole, Marte, Giove, Saturno e stelle fisse. Con tale sistema (detto anche **geocentrico** perché poneva la Terra al centro) Tolomeo prevedeva, con una certa precisione, il moto degli astri, ma il tutto era talmente complicato che una volta Alfonso X il saggio (1221 - 1284), re di Castiglia, commentò: *"Se l'Onnipotente avesse chiesto il mio parere prima di imbarcarsi nella creazione, io gli avrei consigliato qualcosa di più semplice"*.

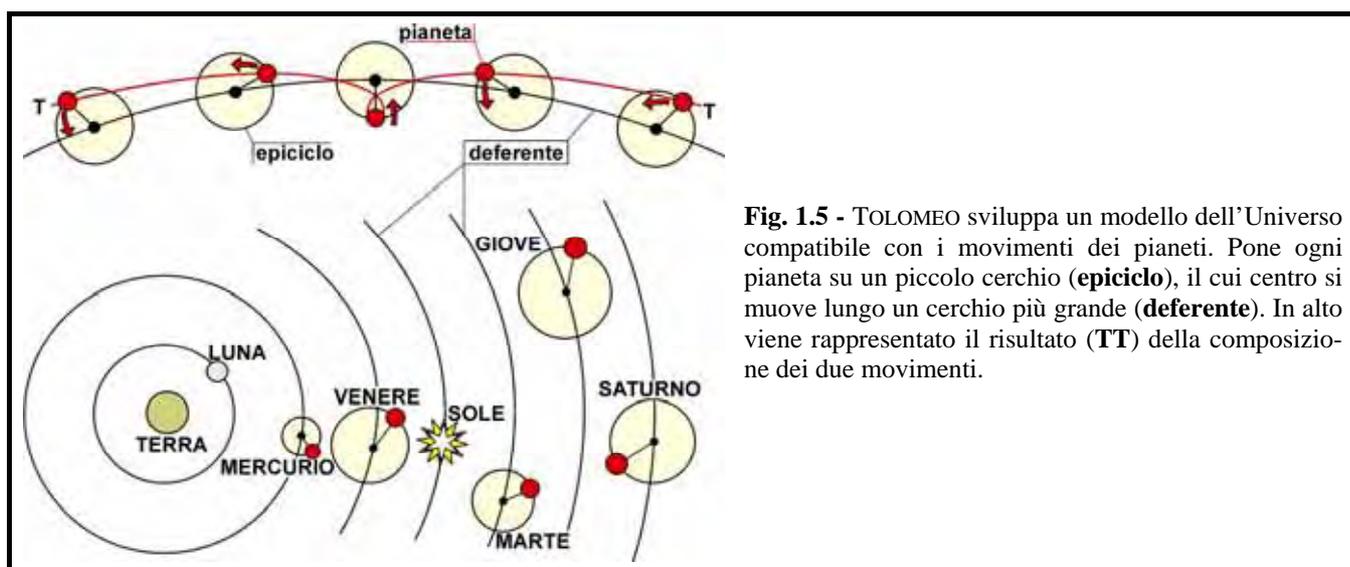


Fig. 1.5 - TOLOMEO sviluppa un modello dell'Universo compatibile con i movimenti dei pianeti. Pone ogni pianeta su un piccolo cerchio (**epiciclo**), il cui centro si muove lungo un cerchio più grande (**deferente**). In alto viene rappresentato il risultato (TT) della composizione dei due movimenti.

Questo "qualcosa di più semplice" fu compreso dall'astronomo polacco COPERNICO nel 1543; nel suo libro (*De revolutionibus orbium coelestium*) propose un nuovo sistema, con il Sole al centro dell'Universo (sistema **eliocentrico**). La Terra è il terzo pianeta in ordine di sequenza dall'astro solare; essa ruota su se stessa (**rotazione**) in 24 ore e intorno al Sole (**rivoluzione**) in un anno; la Luna ruota intorno alla Terra; la sfera delle stelle fisse è immobile. Scarse furono le ripercussioni del **sistema copernicano** sul pensiero scientifico del suo tempo, dato

che, da un punto di vista matematico, equivale al sistema tolemaico. I fatti, allo stato delle conoscenze di quel tempo, potevano essere spiegati in modo ugualmente soddisfacente sia con il sistema di Copernico, sia con quello di Tolomeo. Sarebbero stati necessari nuovi elementi, osservazioni più approfondite, misure più accurate, calcoli più precisi, affinché tutta l'importanza della teoria copernicana potesse essere valorizzata nella sua importanza. A ciò contribuirono lo scienziato tedesco Giovanni KEPLERO (1571 - 1630), Galileo e Newton (**scheda 1.2**).

1.3 - Meteoriti e comete

Le **comete** sono generalmente formate da un nucleo centrale molto brillante, circondato da una nebulosità detta **chioma**. Al nucleo è quasi sempre annesso uno strascico meno luminoso detto **coda**. Alcune comete fanno parte del Sistema Solare; esse descrivono orbite ellittiche più o meno eccentriche; sono le **comete periodiche** perché appaiono ad intervalli di tempo più o meno lunghi. Fra esse ricordiamo la *cometa di Encke*, con un periodo di rivoluzione di 3 anni e 104 giorni, la *cometa di Halley*, che compare ogni 76 anni (**fig. 1.6**), la *cometa di Ikeya Seki*, passata vicino al Sole il 20 settembre 1965. Le comete che non fanno parte del sistema solare (**aperiodiche**) provengono dallo spazio, passano vicino al Sole e fuggono nella direzione opposta a quella di provenienza, senza fare più ritorno. Le orbite delle comete, quando intersecano quelle dei pianeti o quando passano vicino al Sole, possono modificarsi, senza escludere la possibilità di uno "scontro" con un pianeta. Nel 1910 si temette che una simile eventualità potesse verificarsi con la cometa di Halley; i timori erano fondati perché quella cometa ha una testa (il nucleo con la chioma) con un diametro di circa un milione di chilometri e una coda lunga settanta milioni di chilometri. Lo studio delle circa mille comete osservate dalla Terra ha permesso di ipotizzare la loro composizione. Il nucleo sembra formato da materiali solidi allo stato incandescente, mentre chioma e coda, che costituiscono la maggior parte del volume, sono formate da materia tenue e meno densa dell'aria. I materiali che le compongono sembrano idrogeno, elio, carbonio, sodio, ferro, nichel,...



Fig. 1.6 - A sinistra è la **Cometa di Halley**, la più famosa e brillante delle comete periodiche provenienti dalla Fascia di Kuiper¹, passanti per le regioni interne del Sistema Solare ad intervalli di decine di anni. È così chiamata in onore di Edmond HALLEY (1656 - 1742), che per primo ne predisse il ritorno al perielio.



A destra. In certi periodi dell'anno le meteore luminose (stelle cadenti) sono particolarmente numerose, determinando una sorta di "pioggia" spettacolare.

Le **meteore luminose** appaiono come strie luminose che solcano il cielo, visibili nelle notti serene (*stelle cadenti*). Sono corpi che, giungendo dallo spazio, penetrano nell'atmosfera terrestre con grande velocità (30 ÷ 90 km/s), diventando incandescenti per il calore prodotto dall'attrito con l'aria. Le meteore compaiono con maggior frequenza in certi periodi dell'anno (8 ÷ 13 agosto e 10 ÷ 14 novembre) in quanto la Terra, nella sua orbita intorno al Sole, incontra "sciame" di corpuscoli che formano insieme viaggianti nello spazio secondo proprie orbite (**fig. 1.6**). La maggior parte delle meteore si "consumano" bruciando durante la discesa verso la superficie terrestre; alcune di esse (**meteoriti**) raggiungono il suolo ridotte a piccole dimensioni, frantumandosi senza conseguenze. Tuttavia non è da escludere la possibilità di meteoriti di grandi dimensioni in grado di provocare effetti devastanti. Il meteorite di Bacubirito (Messico), di 50.000 kg, precipitò nel Canon Diablo dell'Arizona, sprofondando nel terreno e lasciando un cratere largo 1.500 m e profondo 150 m. Un altro meteorite produsse un impatto nel territorio di Tnguska (Siberia) che si udì ad oltre 100 km di distanza e provocò una sorta di ciclone che devastò le foreste per un raggio di 25 km. I meteoriti, in base alla loro composizione, vengono distinti in:

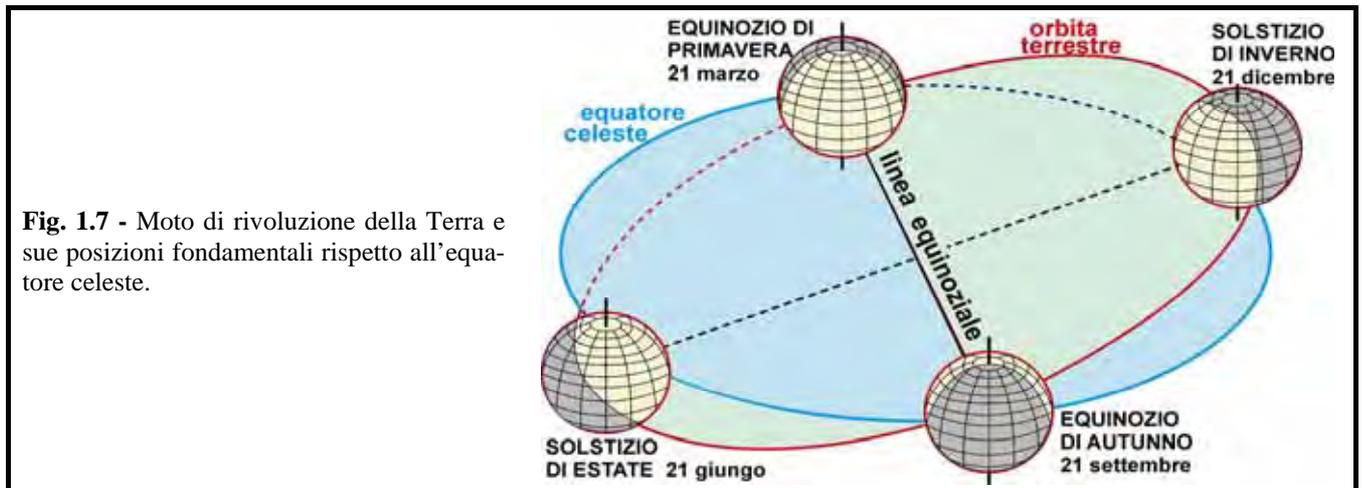
olosideriti (contenenti ferro accompagnato da nichel), *sideriti* (costituiti da metalli e da frammenti rocciosi),
sporadosideriti (prevalentemente materiale roccioso), *asideriti* (esclusivamente materiale roccioso).

¹ La **Fascia di Kuiper** è una regione del Sistema Solare che si estende dall'orbita di Nettuno (alla distanza di $4.500 \cdot 10^6$ km) fino a $7.500 \cdot 10^6$ km dal Sole. È una fascia di asteroidi esterna rispetto all'orbita dei pianeti maggiori.

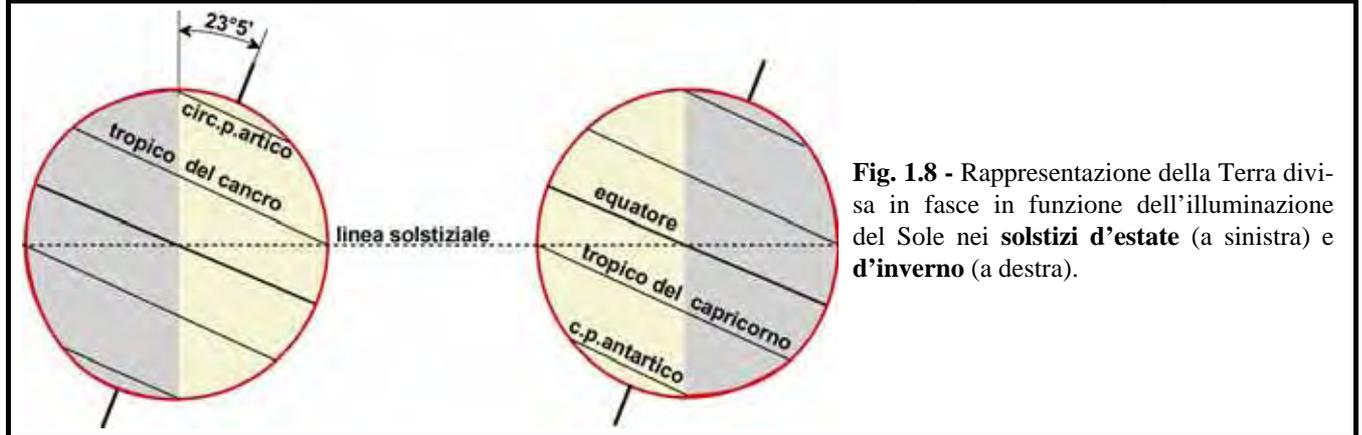
Sulla Terra, oltre ai meteoriti, giunge, in modo impercettibile, una “pioggia” di materiali molto fini. Si tratta di pulviscolo extraterrestre, facilmente rilevabile sulle nevi dei poli. L’esploratore NORDENSKJOLD, sciogliendo grandi quantità di nevi della Groenlandia, ottenne un residuo costituito di questo materiale, detto **polvere meteorica**. Talvolta il fenomeno può essere più vistoso del solito; il 3 maggio 1892, in Svezia, Norvegia, Danimarca e territori vicini, precipitarono circa 500 tonnellate di quella polvere. Si suppone che questa materia derivi dalla disgregazione delle meteore luminose quando entrano nell’atmosfera terrestre, ma non è da escludere che essa sia composta anche da detriti molto fini provenienti dallo spazio celeste (**polvere cosmica**).

1.4 - La Terra ed il Sole

L’anno è l’intervallo di tempo che la Terra impiega per un giro completo intorno al Sole (**fig. 1.7**). Il nostro pianeta ruota di 360°, nel tempo di un giorno, intorno ad un asse passante per i Poli (rotazione; **schede 1.3, 1.4 e 1.5**). L’asse non è perpendicolare rispetto al piano dell’orbita, ma inclinato di ~ 23° 5’ rispetto alla sua normale. Se fosse perpendicolare al piano dell’orbita, in tutte le parti del pianeta ogni giorno dell’anno avrebbe 12 ore di luce e 12 ore di buio. In tale situazione le condizioni climatiche degli emisferi Nord e Sud sarebbero uguali. In realtà, come indicato al punto del solstizio d’estate della **fig. 1.7** ed a sinistra della **fig. 1.8**, l’emisfero boreale è più inclinato verso il Sole e, al contrario di quello australe, ha più di 12 ore di luce; sei mesi dopo la situazione è inversa. I due punti sono i culmini dell’estate (**solstizio d’estate** - 21 giugno) e dell’inverno (**solstizio d’inverno** - 21 dicembre). Nell’emisfero Nord il 21 dicembre è il giorno con la notte più lunga; con il passare dei mesi il numero di ore di luce aumenta fino al 21 marzo (**equinozio di primavera**) quando il giorno è diviso in 12 ore di luce e 12 ore di buio (**fig. 1.9**). Successivamente le notti si accorciano ulteriormente fino a raggiungere il minimo il 21 giugno. La durata della luce poi diminuisce fino a una situazione di nuova parità fra buio e luce, il 21 settembre (**equinozio di autunno**); infine le notti si allungano ancora fino a ritornare nuovamente al solstizio d’inverno. Questi quattro momenti dell’orbita terrestre segnano i limiti delle **stagioni astronomiche**.



solstizio d’inverno	21 dicembre	equinozio di primavera	21 marzo	inverno
equinozio di primavera	21 marzo	solstizio d’estate	21 giugno	primavera
solstizio d’estate	21 giugno	equinozio d’autunno	21 settembre	estate
equinozio d’autunno	21 settembre	solstizio d’inverno	21 dicembre	autunno



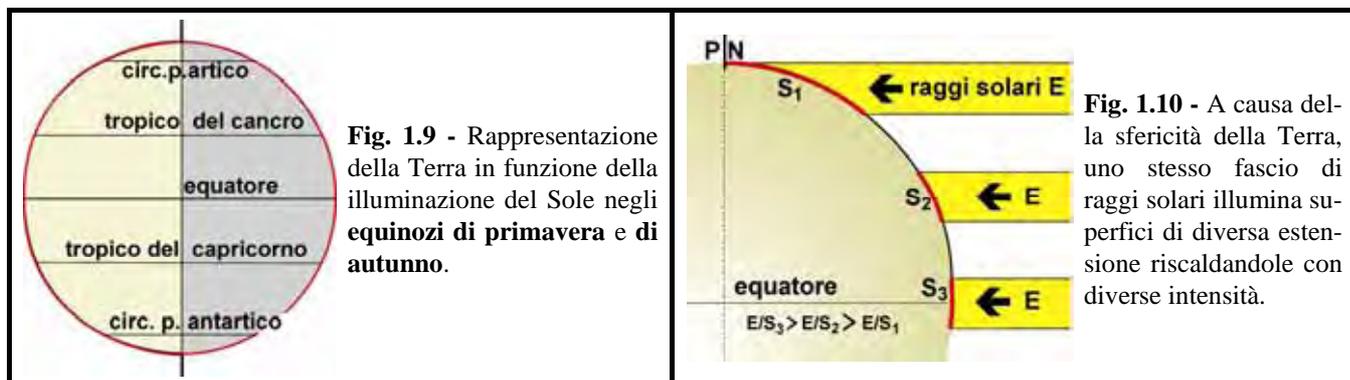


Fig. 1.9 - Rappresentazione della Terra in funzione della illuminazione del Sole negli equinozi di primavera e di autunno.

Fig. 1.10 - A causa della sfericità della Terra, uno stesso fascio di raggi solari illumina superfici di diversa estensione riscaldandole con diverse intensità.

Il clima cambia a seconda delle stagioni e della distanza dai poli; le stagioni meteorologiche non coincidono con quelle astronomiche (il vero inverno inizia circa un mese prima del 21 dicembre). L’inverno e l’estate sono le stagioni fredda e calda per l’emisfero Nord e viceversa per l’emisfero Sud (**fig. 1.8**). La Terra è divisa in fasce:

- **zona glaciale artica**; tra il Polo Nord e il **circolo polare artico**; per sei mesi, tra i due equinozi autunno-primavera, è sempre buio con inverno rigido; nel periodo 21 marzo ÷ 21 settembre il Sole non tramonta mai, rimanendo basso sull’orizzonte; i raggi sono molto inclinati, quasi radenti la superficie terrestre e poco efficaci nel riscaldare la Terra (**fig. 1.10**); in estate le temperature sono ancora basse (prossime allo 0 °C), tanto che la neve accumulata al suolo nell’inverno non si scioglie completamente, accumulandosi anno dopo anno;
- **zona temperata boreale**; tra il circolo polare artico ed il **tropico del cancro**; gli inverni sono freddi con notti lunghe; in estate le temperature sono più elevate, con poche ore di buio; il Sole è più alto sull’orizzonte e scalda maggiormente la Terra, sia perché i raggi luminosi sono più “diretti” (**fig. 1.10**), sia perché la durata della luce prevale su quella del buio; nei mesi caldi si scioglie la neve caduta nell’inverno (ad eccezione delle più elevate zone montuose); nelle stagioni intermedie e in special modo negli equinozi, vi è equilibrio fra luce e buio ed il clima è intermedio rispetto a quelli invernale ed estivo;
- **zona torrida**; tra il tropico del cancro e il **tropico del capricorno**; è la fascia dove minori sono le differenze fra le stagioni e dove gli inverni non sono mai rigidi (tranne le zone montuose più elevate); il clima generale è caldo in conseguenza della radiazione luminosa che giunge, per molte ore, perpendicolarmente o quasi, alla superficie terrestre (**fig. 1.10**); presso l’equatore non vi sono differenze stagionali;
- **zona temperata australe**; tra il tropico del capricorno e il **circolo polare antartico**; analoga alla zona temperata boreale, ma con inverni caldi ed estati fredde;
- **zona glaciale antartica**; tra il circolo polare antartico e il Polo Sud; analoga alla zona polare artica, ma con buio fra gli equinozi primavera-autunno.

distanza dalla Terra	150·10⁶ km	8 minuti alla velocità della luce
raggio	700·10³ km	109 volte quello della Terra
volume	1,41·10¹⁸ km³	1.304.000 volte quello terrestre
superficie	6,12·10¹² km²	12.000 volte quella terrestre
massa	2·10³⁰ kg	333.000 volte quella terrestre
densità media	3,9	1/4 di quella terrestre
gravità superficiale	275 m/s²	28 volte quella terrestre

Tab. 1.1 - Caratteristiche del Sole.

distanza media dalla Terra	384.403 km	circa 30 diametri terrestri
distanza massima dalla Terra	405.506 km	apogeo
distanza minima dalla Terra	363.300 km	perigeo
raggio	1.738 km	poco più di 1/4 di quello terrestre
volume	2,20·10¹⁰ km³	1/49 di quello terrestre
superficie	38·10⁶ km²	1/13 di quella terrestre
massa	7,4·10²² kg	1/81 di quella terrestre
densità media	336	simile a quella terrestre
gravità superficiale	1,62 m/s²	1/6 di quella terrestre

Tab. 1.2 - Caratteristiche della Luna.

Il Sole è immensamente più grande dei pianeti. Il suo diametro è 109 volte più grande di quello terrestre; il suo volume supera enormemente quello di tutti i pianeti messi insieme, 1.300.000 volte quello della Terra (**tab. 1.1**),

dalla quale dista 150 milioni di chilometri, una distanza che la luce ($c \cong 300.000 \text{ km/s}$) percorre in otto minuti. Plutone, il pianeta più lontano, si trova a una distanza 40 volte maggiore rispetto a quella della Terra. Per avere un'idea delle proporzioni dovremmo immaginare una sfera di un metro di diametro (Sole) intorno alla quale, ad 1 km di distanza, orbita una pallina (Terra) con diametro di 1 cm. Il Sole è la stella più vicina; quindi appare molto più grande di quelle osservabili nella volta celeste, delle quali la più vicina (*Alfa Centauri*) dista $40.000 \cdot 10^9 \text{ km}$ (per raggiungerla occorrerebbero 4 anni, viaggiando alla velocità della luce). Il Sole è una sfera gassosa, con una temperatura di circa $6.000 \text{ }^\circ\text{C}$ in superficie e con nucleo sensibilmente più caldo (intorno ai venti milioni di gradi).

1.5 - La Terra e la Luna

La Luna (**tab. 1.2**) è un satellite della Terra, un corpo sferico privo di acqua e di atmosfera che, orbitando intorno al nostro pianeta, mostra sempre la stessa faccia; come una persona che gira intorno ad un tavolo, volgendo sempre la faccia verso di esso; tornando alla posizione di partenza, avrà compiuto anche una rotazione su se stessa: la durata della rotazione della Luna intorno al suo asse è uguale a quella di rivoluzione intorno alla Terra.

Sulla superficie della faccia visibile appaiono vaste pianure (più scure), denominate *mari*. Sono presenti catene montuose, come i monti Leibnitz che raggiungono gli 8.200 m di altezza. Numerosi sono i *crateri* con dimensioni molto varie (da un metro a centinaia di chilometri di diametro; **scheda 1.6**); i più grandi hanno al centro un picco e sono spesso circondati da numerosi altri rilievi, di minori dimensioni. Dai margini esterni dei più grandi crateri si dipartono lunghi raggi più chiari ed il suolo lunare è molto irregolare con molti ciottoli e molta polvere. La struttura della faccia nascosta della Luna (fotografata per la prima volta dalla sonda sovietica Lunik III, nel 1959) è simile a quella visibile dalla Terra, salvo la quasi totale assenza dei mari e le minori dimensioni dei crateri.

L'assenza di un'atmosfera rende l'ambiente della superficie lunare molto diverso da quello terrestre ed è quanto hanno osservato i primi uomini che sbarcarono sulla Luna a seguito della spedizioni americane Apollo, negli anni '60 (**fig. 1.11**). La temperatura delle zone in ombra e illuminate oscilla tra $-100 \text{ }^\circ\text{C}$ e $+110 \text{ }^\circ\text{C}$; sulla Terra questa differenza è molto attenuata dalla presenza di aria che consente scambi di energia fra zone diverse. Il cielo, visto dalla Luna, appare completamente nero, mentre sulla Terra il colore azzurro è dovuto alla dispersione della luce causata dalle particelle di gas che compongono l'atmosfera. Il Sole appare molto più luminoso (accecante) e le stelle appaiono in maggior numero e con miglior evidenza, ma non "brillano". Nella notte lunare vi è una diffusa luce verde bluastra riflessa dal nostro pianeta. Tutti gli oggetti hanno un peso circa sei volte minore.

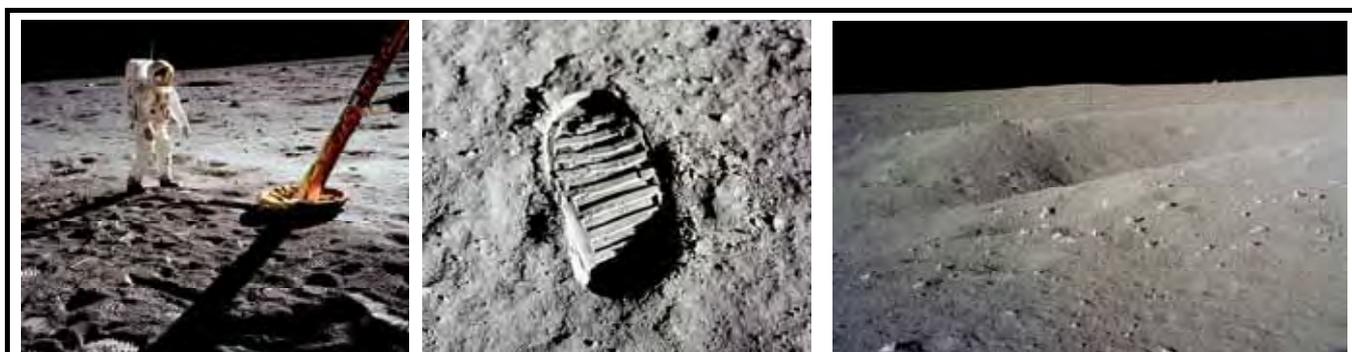


Fig. 1.11 - Il 20 luglio 1969 è una data storica dell'esplorazione della Luna. Neil AMSTRONG ed Edwin ALDRIN furono i primi esseri umani a calpestare il suolo lunare (lasciando la prima impronta umana) atterrando con l'astronave Apollo 11 nel Mare della Tranquillità, un ambiente che ricorda i deserti di sabbia terrestri. Il cielo molto scuro e i forti contrasti tra le ombre nere e le zone illuminate da un chiarore quasi accecante sono dovuti alla mancanza di una atmosfera. La superficie è ricoperta da materiali fini, una sorta di "polvere" dovuta, in gran parte, all'azione demolitrice termoclastica, che riduce in frantumi le rocce superficiali soggette a continue dilatazioni e contrazioni per le forti escursioni termiche.

La Luna compie un giro completo intorno alla Terra in 27 giorni, 7 ore e 43 minuti (**rivoluzione siderea** o **mese sidereo**) e ogni sera sorge con cinquanta minuti di ritardo rispetto la sera precedente (**scheda 1.7**). Nello stesso tempo compie un giro su se stessa. L'asse di rotazione non è perfettamente perpendicolare al piano di rivoluzione; l'angolo che forma con esso è di $88^\circ 30'$. La Luna percorre un'orbita ellittica con la Terra in uno dei fuochi; pertanto in certi punti la distanza fra i due astri è minore (**perigei**) mentre in altri (**tab. 1.2**) è maggiore (**apogei**). Il moto di rivoluzione lunare è complicato da quello di **traslazione**, cioè dal movimento che il nostro satellite, per seguire la Terra, compie intorno al Sole. Pertanto la Luna percorre, nello spazio, una traiettoria complessa, a forma di spirale lungo la traiettoria della Terra.

Quando la Luna, durante il suo moto, si trova fra il Sole e la Terra (in *congiunzione*) si ha la fase di **novilunio** o Luna nuova (**fig. 1.12**, posizione 1). Il nostro satellite è invisibile dato che ci rivolge la faccia in ombra, poco distinguibile rispetto al cielo notturno. Tuttavia la Luna presenta un lieve chiarore (luce cinerea) che la rende percettibile; esso è dovuto alla luce solare riflessa dalla Terra. Dopo poco più di una settimana, la Luna si trova a fianco della Terra rispetto al Sole (**fig. 1.12**, posizione 3). Le direzioni Sole-Terra e Terra-Luna formano un angolo retto (*quadratura*) per cui è visibile metà della parte illuminata, pari a un quarto di tutta la superficie lunare (*primo quarto*). Dopo un'altra settimana il Sole e la Luna si trovano da parti opposte rispetto alla Terra (in *opposizione*); pertanto si vede tutta la faccia illuminata del nostro satellite (**fig. 1.12**, posizione 5); questa è la fase del **plenilunio** (Luna piena). Proseguendo nella sua orbita la Luna, giunta ormai a tre quarti di rivoluzione sinodica, si trova nuovamente in posizione di quadratura, ma opposta alla precedente (*ultimo quarto*; **fig. 1.12**, posizione 7). Questa è la fase che precede il ritorno, dopo poco più di 29 giorni, alla prima fase di novilunio. Le due posizioni di Luna nuova e di Luna piena sono chiamate *sigizie*.

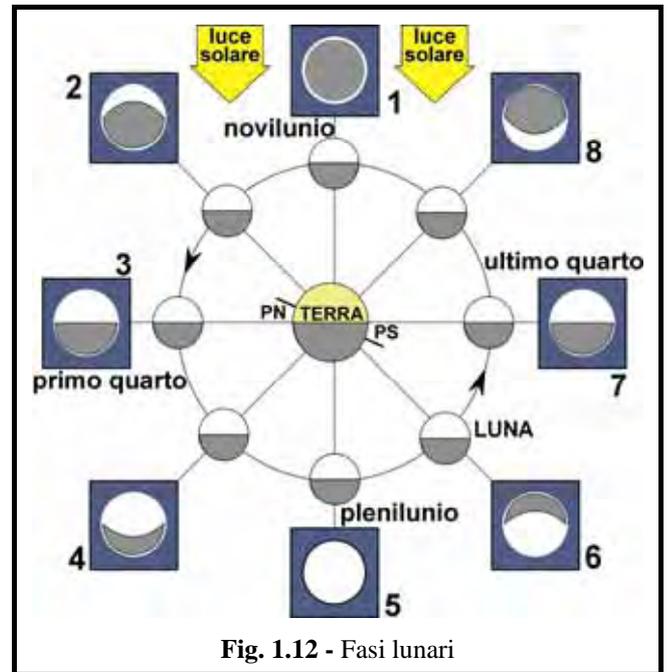


Fig. 1.12 - Fasi lunari

La Terra e la Luna sono sfere opache; non emettono luce, ma formano, dalla parte opposta a quella illuminata dal Sole, un cono d'ombra. I piani delle loro orbite non coincidono (fra essi l'angolo è poco più di 5°) altrimenti ad ogni plenilunio il cono d'ombra della Terra oscurerebbe la Luna, e viceversa ad ogni novilunio. Situazioni di perfetto allineamento si verificano solo in certe condizioni; in particolare quando la Luna, in plenilunio o in novilunio, si trova sulla retta di intersezione delle orbite lunare e terrestre (**linea dei nodi**; **fig. 1.13**). Durante la fase di Luna piena si ha l'**eclissi di Luna**, mentre durante la fase di Luna nuova si ha l'**eclissi di Sole**.

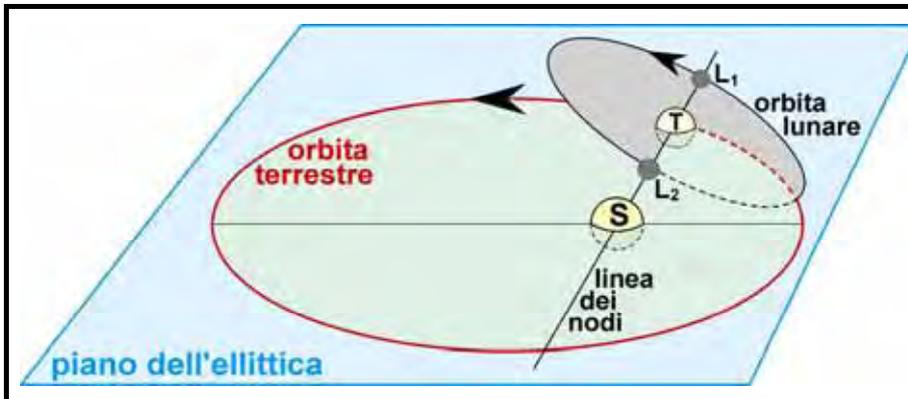


Fig. 1.13 - Rappresentazione della **linea dei nodi** e dell'inclinazione dell'orbita lunare sul piano dell'orbita terrestre (**eclittica**). L'angolo fra le due orbite è pari a $5^\circ 9'$ (che nella figura è rappresentato con ampiezza esagerata).



Fig. 1.14 - Fase iniziale dell'eclissi di Luna. Si osserva l'avanzare dell'ombra della Terra proiettata sulla superficie del satellite.

L'eclissi di Luna è osservabile dalla porzione al buio della Terra (da due a tre volte all'anno in zone diverse) e può essere *totale* se il satellite viene interamente oscurato, oppure *parziale* se solo una parte di esso viene investito dal cono d'ombra terrestre (**fig. 1.14**). L'eclissi di Sole è osservabile dalla porzione illuminata della Terra e non determina un oscuramento completo di quest'ultima, ma una fascia generalmente inferiore a 275 km. Anche in questo caso si possono distinguere eclissi totali e parziali che possono verificarsi da due a cinque volte l'anno in zone diverse del pianeta (**figg. 1.15** e **1.16**).

Le maree sono conseguenza delle reciproche posizioni del Sole, Terra, Luna. Il mare sale gradualmente per sei ore e un quarto circa, fino a raggiungere un livello massimo (**alta marea**). Successivamente il livello marino si abbassa raggiungendo un minimo dopo lo stesso intervallo di tempo (**bassa marea**); la dif-

ferenza fra i due livelli estremi è detta *ampiezza della marea*. In 24 ore e 50 minuti (giorno lunare) si verificano due alte e basse maree. Il fenomeno è dovuto alle attrazioni gravitazionali della Luna e del Sole sulla Terra.

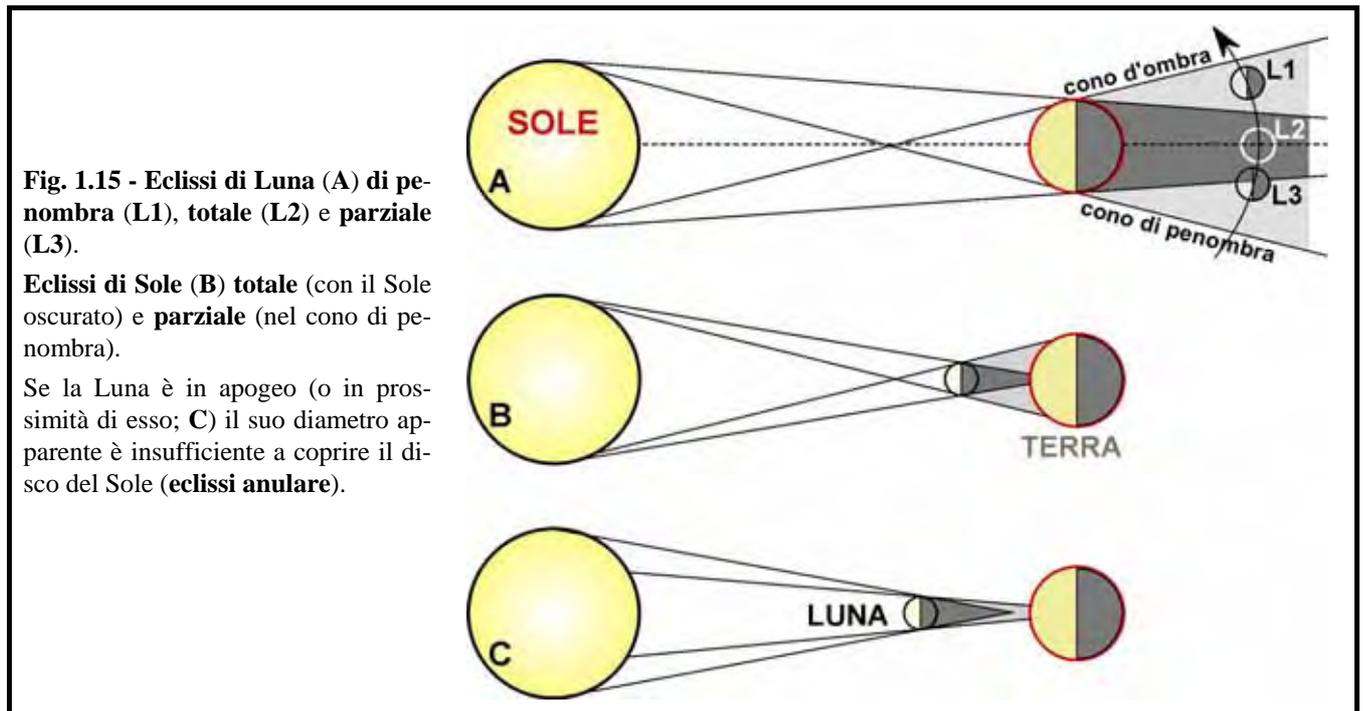
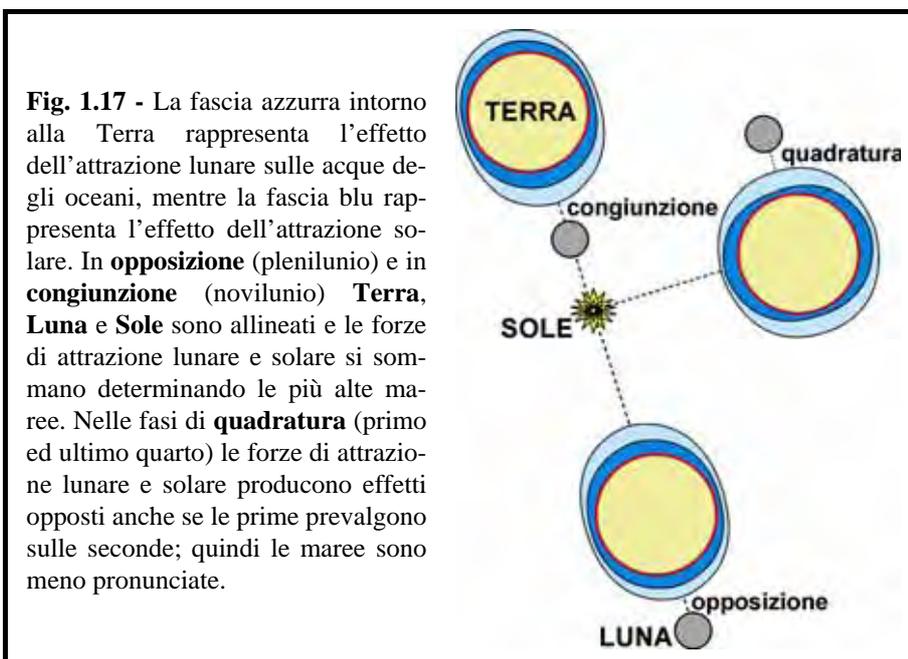


Fig. 1.16 - Con l'eclissi solare (a sinistra) la Luna oscura il disco luminoso. Vi sono quindi le condizioni migliori per osservare i "pennacchi" (*flare*) dovuti all'attività della corona solare; essi comportano la dispersione, verso l'esterno, di materia ed energia che si manifesta, in occasione delle manifestazioni più intense, come "vento solare" che giunge fino al nostro pianeta.



A destra è un'immagine ripresa da satellite che mostra, su una porzione della superficie della Terra, l'ombra generate da un'eclissi solare.



Il nostro satellite, pur di massa molto inferiore a quella del Sole, essendo molto più vicino, esercita una attrazione più che doppia. Questa forza non si avverte sui materiali solidi, ma produce effetti vistosi sulle masse liquide dei mari. Quando la Luna passa su un determinato punto della superficie terrestre, in esso si verifica la massima attrazione (culmine dell'alta marea); contemporaneamente la forza centrifuga del sistema Terra-Luna raggiunge la massima intensità agli antipodi provocandovi pure un innalzamento del livello marino. Ciò spiega il motivo per cui in ogni punto degli oceani si susseguono due alte e basse maree ogni giorno.

L'alta marea può essere più o meno elevata a seconda della fase lunare (**fig. 1.17**). L'ampiezza della marea è poco accentuata nei mari interni. Nel Mediterraneo è di pochi centimetri e raggiunge il massimo nei golfi di Gabes (Piccola Sirte) con 1,5 m (80 cm a Venezia). Nell'oceano Atlantico da uno a tre metri. Nella baia di Fundy (Nuova Scozia) arriva fino a venti metri (ampiezza massima finora riscontrata).

1.6 - I pianeti

Ad occhio nudo i pianeti appaiono come punti luminosi, non molto diversi dalle stelle fisse. Con un cannocchiale, appaiono come dischetti luminosi. Fu Galileo ad osservarli per primo con uno strumento ottico e a scoprire, nel 1610, quattro satelliti di Giove. Oltre alla Terra, che possiede un satellite, Marte ne ha 2, Giove ben 13, Saturno 10, Urano 5, Nettuno 2 e Plutone forse uno, mentre Mercurio e Venere ne sembrano privi. Uno dei due satelliti di Urano e di Saturno e due di Giove, hanno dimensioni cospicue, più grandi del pianeta Mercurio, mentre quelli di Marte sono i più piccoli (il maggiore dei quali, Phobos, di forma irregolare, misura solo 15 km di diametro).

I telescopi hanno permesso la scoperta di altri corpi di minori dimensioni che orbitano intorno al Sole; sono i **pianetini** o **asteroidi**, il più grande dei quali (Cerere) misura 800 km di diametro. Quasi tutti sono molto più piccoli, fino alle dimensioni di grani di sabbia. Molti hanno orbite fra quelle di Marte e di Giove, altri intersecano l'orbita della e alcuni di essi penetrano nella sua atmosfera originando le meteore luminose (**fig. 1.6**).

Nel 1672 l'astronomo bolognese CASSINI calcolò la distanza Terra - Marte, stabilendo una sorta di "scala" del Sistema Solare. Fino a quel tempo erano note solo le distanze relative, ma non i valori assoluti. Da quel momento furono calcolate tutte le distanze effettive dei pianeti dal Sole (**fig. 1.18**). I dati in **tab. 1.3** mettono in evidenza come i pianeti siano molto diversi, non solo come dimensioni (dal diametro massimo di Giove, 11 volte quello della Terra, al minimo di Mercurio, quasi 1/3 di quello terrestre), ma anche come massa. Quella di Giove è più di 6.000 volte più grande di quella del più piccolo pianeta Mercurio. Tuttavia, dall'esame dei valori di densità i materiali che costituiscono Giove sembrano circa 4 volte più "leggeri" dei pianeti più piccoli. La **fig. 1.19** è una rappresentazione schematica del Sistema Solare. La **scheda 1.8** riporta una descrizione più dettagliata dei pianeti.

	Mercurio	Venere	Terra	Marte	Giove	Saturno	Urano	Nettuno	Plutone
distanza max.dal Sole [10^6 km]	69,7	109	152,1	249,1	815,7	1.507	3.004	4.537	7.375
distanza min.dal Sole [10^6 km]	45,9	107,4	147,1	206,7	740,9	1.347	2.735	4.456	4.425
distanza med.dal Sole [10^6 km]	57,9	108,2	149,6	227,9	778,3	1.427	2.870	4.497	5.900
periodo rivoluzione	88 giorni	225 giorni	365 giorni	687 giorni	12 anni	29 anni	84 anni	165 anni	248 anni
periodo rotazione	59 giorni	243 giorni	24 ore	25 ore	9 ore	10 ore	11 ore	16 ore	6 giorni
velocità orbitale [km/s]	47,9	35	29,8	24,1	13,1	9,6	6,8	5,4	4,7
eccentricità orbita	0,206	0,007	0,017	0,093	0,048	0,056	0,047	0,009	0,25
diametro equat. [10^3 km]	4,88	12,10	12,76	6,79	142,80	120,0	51,8	49,5	6 (?)
massa (Terra = 1)	0,055	0,815	1	0,108	317,9	95,2	14,6	17,2	0,1 (?)
volume (Terra = 1)	0,06	0,88	1	0,15	1316	755	67	57	0,1 (?)
densità (acqua = 1)	5,4	5,2	5,5	3,9	1,3	0,7	1,2	1,7	?
componenti atmosfera	nessuno	CO ₂	N, O	CO ₂ , Ar	H, He	H, He	H,He,CH ₄	H,He,CH ₄	?
Temp. med. [°C] sup.	170-350	-33 (N)	15 (S)	-23 (S)	-150 (N)	-180 (N)	-210 (N)	-220 (N)	-230 (?)
pressione atm.sup.[mbar]	10^{-9}	90.000	1.000	6	?	?	?	?	?
gravità sup. (Terra = 1)	0,37	0,88	1	0,38	2,64	1,15	1,17	1,18	?
numero satelliti noti	0	0	1	2	13	10	5	2	0

Tab. 1.3 - Caratteristiche dei pianeti del Sistema Solare. Le rotazioni di Mercurio e di Urano sono retrograde ed i periodi di rotazione e di rivoluzione indicati sono approssimati.

1.7 - Il Sistema Solare nell'Universo

Nel secondo decennio del novecento si scoprì che il Sistema Solare non si trova al centro dell'Universo. Harlow SHAPLEY, nel 1918, affermò che il Sole si trova alla distanza di 32.600 anni luce dal centro della **Via Lattea**, una galassia (insieme di oltre 100 miliardi di stelle) con l'aspetto di un disco appiattito, di diametro di circa 100.000

anni luce e spesso 10.000 anni luce (**fig. 1.20**). Fu una scoperta che limitò notevolmente l'orgoglio dell'uomo che, all'interno del Sistema Solare, riteneva di essere al centro dell'Universo. Nel 1925 Edwin HUBBLE fornì la prova che la Via Lattea è solo una porzione dell'Universo, il cui limite venne fissato a dimensioni di oltre mille volte più grandi della nostra galassia e costituito da numerosissimi insiemi stellari che sembrano allontanarsi dalla Terra alla velocità di fuga pari ad oltre 3.000 km/s (**scheda 1.9**).

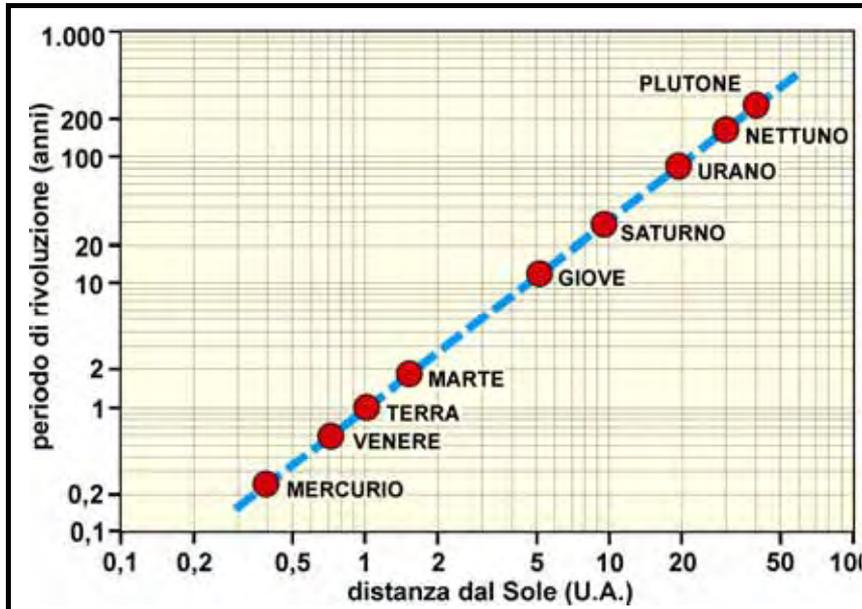


Fig. 1.18 - Utilizzando i dati relativi al periodo di rivoluzione ed alla distanza dal Sole di ciascun pianeta (riportati in **tab. 1.3**) si ottiene un diagramma che illustra come, all'aumentare della distanza, aumenta il tempo impiegato per compiere un giro completo intorno al Sole stesso. I pianeti sono allineati lungo una retta e le scale delle ascisse e delle ordinate sono espresse sotto forma di logaritmi.

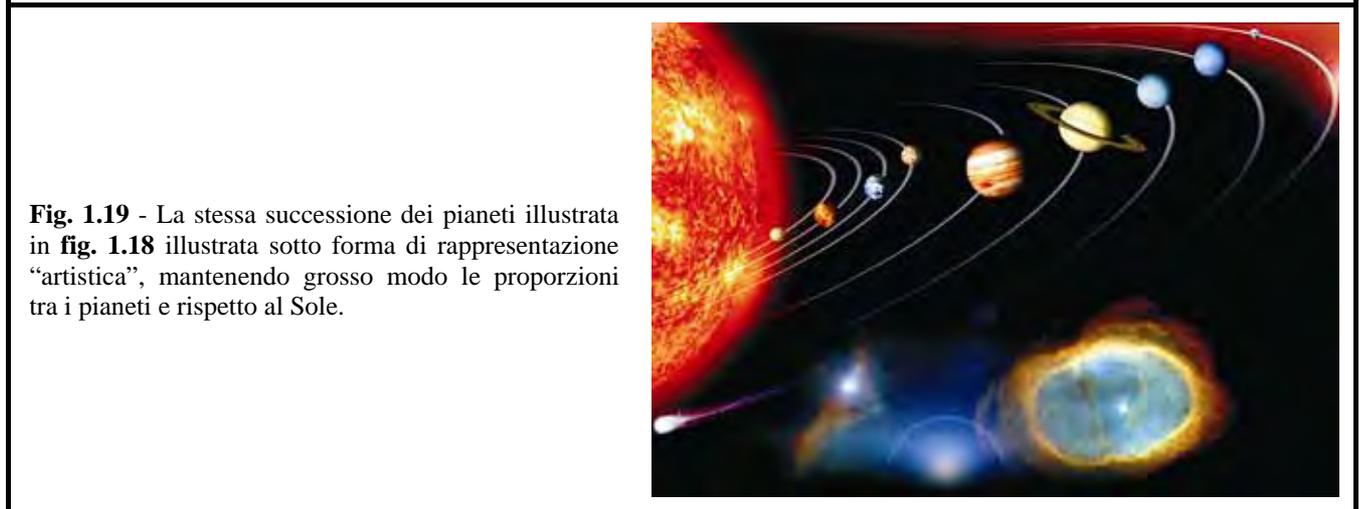


Fig. 1.19 - La stessa successione dei pianeti illustrata in **fig. 1.18** illustrata sotto forma di rappresentazione "artistica", mantenendo grosso modo le proporzioni tra i pianeti e rispetto al Sole.

Oggi si ritiene che le galassie siano riunite in gruppi. Uno di questi comprende 24 membri, di cui uno è la Via Lattea, collegati da forze gravitazionali. Di questo gruppo fanno parte anche le galassie M31 Andromeda (**fig. 1.21**), M33 del Triangolo e le due Nubi di Magellano. Le galassie sono molto diverse per forme e dimensioni; una loro classificazione è stata proposta dal succitato astronomo Hubble (**fig. 1.22**). Si ritiene che esistano oltre 100 milioni di sistemi extragalattici, che il limite dell'Universo conosciuto è ben oltre 10 miliardi di anni luce e che la velocità di fuga dei corpi più lontani è pari a quella della luce. In sintesi *il Sistema Solare e la Terra sono granelli di polvere al margine di un vasto mondo del quale forse si conosce solo una parte.*

UNITA' DI MISURA ASTRONOMICHE	
Unità Astronomica (UA):	raggio medio dell'orbita terrestre ($1,52 \cdot 10^8$ km) utile per la valutazione delle distanze nel Sistema Solare.
Anno luce (al):	spazio percorso dalla luce ($c \cong 3 \cdot 10^5$ km/s) in un anno; vale $3 \cdot 10^5$ km/s \cdot 365 giorni/anno \cdot 24 ore/giorno \cdot 3.600 s/ora $\cong 9,5 \cdot 10^{12}$ km/anno (quasi 10.000 miliardi di chilometri); utile per valutare le distanze all'esterno del Sistema Solare.
Parsec:	pari a 3,26 anni luce ($3,1 \cdot 10^{13}$ km); corrisponde alla distanza di un punto dal quale si vedrebbe, sotto l'angolo di 1 secondo di arco il diametro dell'orbita terrestre.



Fig. 1.20 - A sinistra si osserva, nel cielo notturno, una fascia più “luminosa”, dove gli astri sono più numerosi e visibili rispetto allo spazio circostante. È l’insieme di stelle (200 miliardi) costituente la galassia “**Via Lattea**”, così detta per il suo aspetto allungato (via) e per il suo chiarore bianco (lattea) che si distingue nel cielo più “scuro”. Il Sole fa parte della Via Lattea, in posizione piuttosto marginale. Quindi la Via Lattea non è interamente visibile da un osservatore sul-



La Terra. A destra è un’immagine “artistica” per rappresentare ciò che si osserverebbe da un punto esterno. La Via Lattea è una galassia a spirale, con un diametro di circa 100.000 anni luce e composta da un nucleo attraversato da una struttura a forma di barra, dalla quale si dipartono i bracci che conferiscono la forma tipica, strettamente connessa alla rotazione.



Fig. 1.21 - La Galassia Andromeda (sopra) è una spirale gigante (mille miliardi di stelle) ad “appena” 2,5 milioni di anni luce dalla Terra. È l’oggetto più lontano visibile ad occhio nudo, senza strumenti di osservazione.

Arp 273 è un gruppo di galassie, tra le quali un oggetto (a lato) composto da due galassie (la UGC 1810, più grande e la UGC 1813, più piccola) alla distanza di 300 milioni di anni luce dal Sistema Solare. Le due strutture sembrano formare una rosa galattica.



	radiazione cosmica	Universo
idrogeno	94,0	86,5
elio	5,4	13,3
altri	0,6	0,2

Tab. 1.4 - Composizione media % della radiazione cosmica primaria e dell’Universo in periodo di attività solare minima.

Informazioni sulla natura della materia dello spazio extraterrestre derivano dall’analisi della **radiazione cosmica**, flusso di materia e di energia (raggi γ) che giunge al nostro pianeta. Si distingue la radiazione *primaria*, rilevata dai satelliti artificiali, da quella *secondaria*, impoverita dall’attraversamento dell’atmosfera. La prima è dovuta alle emissioni dell’attività solare, da sorgenti nella nostra galassia ed anche più lontane. Dalla composizione della radiazione si risale a quella dell’Universo, prevalentemente costituito dagli atomi più leggeri (**tab. 1.4**). Fra i corpi celesti dell’Universo sono presenti

enormi quantità di materia rarefatta (non esistono ampie porzioni di “vuoto assoluto”), più addensata in certe zone a formare nubi di polveri; da queste si possono formare stelle le quali, a loro volta, con eruzioni superficiali o con esplosioni (come accade per il Sole) proiettano nello spazio parte della materia di cui sono costituite.

1.8 - Le stelle

Le stelle sono globi gassosi incandescenti che rimangono compatti per gravità. La loro massa è prevalentemente costituita da idrogeno (3/4) e da elio; meno del 2 % è formato da carbonio, azoto, ossigeno e neon; il ferro ed altri elementi più pesanti rappresentano soltanto lo 0,5 %. A causa della loro grande distanza le stelle appaiono come

punti luminosi sulla volta celeste. Gli antichi, oltre a raggrupparle in **costellazioni** (piccoli gruppi spesso immaginati in forma di figure), le avevano distinte, in base allo splendore apparente (**magnitudine visuale** o **apparente**), in sei classi di grandezza e indicate, in ordine decrescente di luminosità, secondo le prime lettere dell'alfabeto greco. Le stelle più brillanti "alfa" (α) sono 2,5 volte più luminose di quelle classificate nel gruppo successivo "beta" (β), a loro volta 2,5 volte più luminose delle stelle di terza grandezza (γ) e così via.

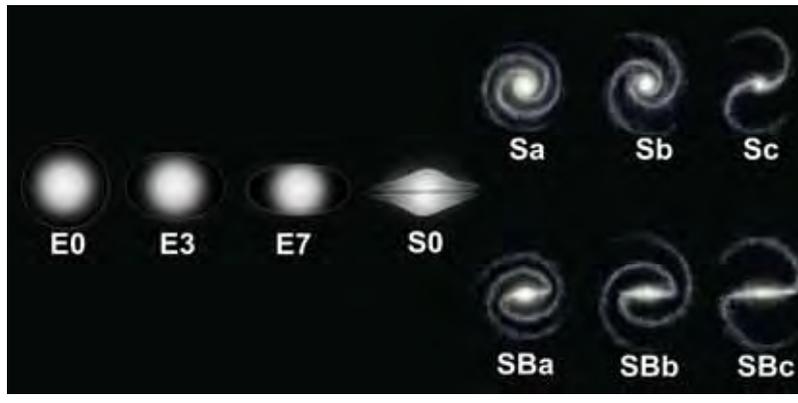


Fig. 1.22 - Nel 1925 l'astronomo statunitense Edwin HUBBLE propose una classificazione delle galassie con l'impiego di un diagramma detto "sequenza di Hubble".

Le galassie ellittiche hanno forma di disco più o meno schiacciato e non mostrano traccia di struttura interna differenziata. In base al grado di ellitticità esse sono suddivise in otto classi da **E0** (sferiche) a **E7** (ellitticità assai pronunciata). La cifra che segue la sigla E rappresenta il grado di ellitticità.

Le galassie a spirale si dividono in due grandi famiglie: quelle a spirale normale (**S**) e quelle a spirale barrata (**SB**). Le braccia a spirale emergono dal nucleo centrale il quale può costituire una frazione più o meno importante della galassia stessa. In base all'importanza relativa del nucleo, le galassie a spirale normale si dividono nei sottogruppi **Sa**, **Sb** (Via Lattea in **fig. 1.20** ed Andromeda in **fig. 1.21**) ed **Sc**. Nelle galassie a spirale barrata le braccia si dipartono a spirale da una sbarra che emerge in corrispondenza del nucleo; queste si suddividono nei tipi **SBa** (le braccia a spirale si avvolgono fino a formare una struttura complessiva quasi circolare intorno alla sbarra che è in posizione diametrale), **SBb** ed **SBc** (con spirali molto più allargate).

Le galassie denominate **S0** presentano un nucleo molto esteso; in esse non è riconoscibile la struttura a spirale ma, a differenza delle galassie ellittiche, presentano bande oscure di materia assorbente. Infine esistono galassie **Irr** dalla forma irregolare e quindi non classificabili in nessuna delle altre categorie.

Le stelle visibili ad occhio nudo, classificabili secondo questo sistema, sono circa 6.000. L'uso del telescopio consente l'osservazione di altre stelle meno luminose, invisibili senza strumenti ottici. Quindi aumenta notevolmente il numero di stelle visibili e la precisione nella definizione della loro luminosità; così è possibile determinare magnitudini inferiori a quelle minime stabilite dagli antichi, in particolare fino ad un valore pari a 22. Inoltre rendendosi necessario ampliare la scala anche verso l'alto, per indicare stelle più luminose, si sono introdotti valori convenzionali negativi. In **tab. 1.5** è riportato l'elenco delle dieci stelle più brillanti. Il Sole ha una magnitudine pari a -26,6.

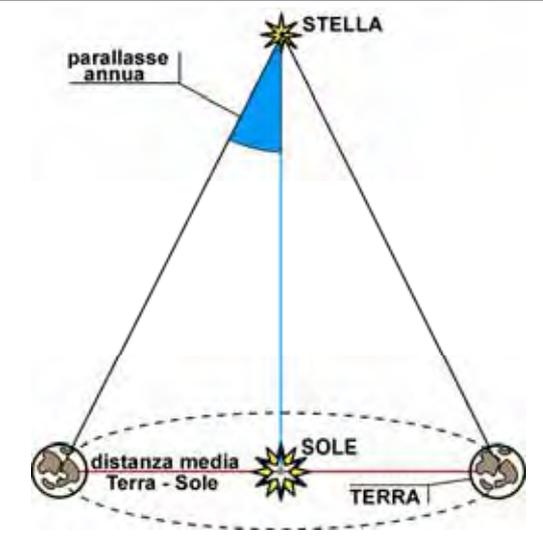


Fig. 1.23 - Rappresentazione schematica della parallasse annua.

Nome stella	Costellazione	Magnitudine
Sirio	Alfa del Cane Maggiore	- 1,43
Canopo	Alfa della Carena	- 0,73
Alfa Centauri	Alfa del Centauro	- 0,27
Arturo	Alfa di Boote	- 0,06
Vega	Alfa della Lira	0,04
Capella	Alfa dell'Auriga	0,09
Rigel	Beta di Orione	0,15
Prozione	Alfa del Cane Minore	0,37
Achemar	Alfa di Eridano	0,53
Beta Centauri	Beta del Centauro	0,66

Tab. 1.5 - Magnitudine visuale delle dieci stelle più brillanti dopo il Sole. La magnitudine non è in relazione con la grandezza degli astri.

La dicitura *apparente* si riferisce alle luminosità delle stelle "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 dallo splendore intrinseco dell'astro sia dalla distanza 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. Si utilizza allora la **magnitudine assoluta**, con la quale 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" e quella assoluta "M" è la seguente:

$$M = m - 5 \cdot \text{Log}d + 5$$

Proxima Centauri	4,3
Stella di Barnard	6,0
Wolf 359	7,7
Luyten 726 - 8	7,9
Lalande 21185	8,2
Sirio del Cane Maggiore	8,7
Ross 154	9,3
Ross 248	10,3
Epsilon di Eridano	10,8
Ross 128	10,9

Tab. 1.6 - Distanze delle dieci stelle più vicine al Sole (valori espressi in anni luce).

dove "d" è la distanza della stella in Parsec. Per determinare la distanza delle stelle si utilizza, come riferimento base, l'unità astronomica. Le due linee di mira dai punti situati all'estremità del raggio medio dell'orbita della Terra verso una determinata stella, formano un angolo (**parallasse annua**) che è funzione della distanza di quella stella rispetto al riferimento base (**fig. 1.23**). Con questo metodo si sono valutate le distanze di 6.000 stelle. Per distanze superiori a 100 parsec si ricorre a metodi indiretti e più sofisticati. In **tab. 1.6** sono indicate le distanze delle dieci stelle più vicine al Sole.

Le stelle hanno un colore (dal bianco al giallo al rosso) che dipende dalla loro temperatura superficiale ($10^3 \div 10^4$ °K). L'analisi dello spettro della luce emessa dalle stelle permette una classificazione che utilizza le lettere dell'alfabeto (**tab. 1.7**). Le dimensioni possono essere molto variabili con raggi da 10^3 a 10^8 km, da un centesimo a mille volte il raggio solare. Colore e dimensioni permettono la distinzione (**figg. 1.24 e 1.25**) in **supergiganti** e **giganti rosse** (con densità media pari a un milionesimo di quella dell'acqua; es. Antares), **nane bianche** (come Sirio, la cui densità è ben 200.000 volte quella dell'acqua), **nane rosse**,... Il Sole è un classico esempio di **nana gialla** con dimensioni simili alla maggior parte delle stelle della galassia (0,5 ÷ 20 volte il raggio solare).

Le stelle hanno un colore (dal bianco al giallo al rosso) che dipende dalla loro temperatura superficiale ($10^3 \div 10^4$ °K). L'analisi dello spettro della luce emessa dalle stelle permette una classificazione che utilizza le lettere dell'alfabeto (**tab. 1.7**). Le dimensioni possono essere molto variabili con raggi da 10^3 a 10^8 km, da un centesimo a mille volte il raggio solare. Colore e dimensioni permettono la distinzione (**figg. 1.24 e 1.25**) in **supergiganti** e **giganti rosse** (con densità media pari a un milionesimo di quella dell'acqua; es. Antares), **nane bianche** (come Sirio, la cui densità è ben 200.000 volte quella dell'acqua), **nane rosse**,... Il Sole è un classico esempio di **nana gialla** con dimensioni simili alla maggior parte delle stelle della galassia (0,5 ÷ 20 volte il raggio solare).

Colore	Temp. superficiale [°K]	Caratteristiche dello spettro	Tipo di spettro	Stelle tipiche
bianco azzurro	35.000 ÷ 50.000	righe He neutro o ionizzato	O	Lambda (Orione)
bianco azzurro	circa 15.000	righe He neutro	B	Epsilon (Orione)
bianco	circa 10.000	dominano righe H	A	Sirio (Cane Mag.)
bianco giallo	circa 7.000	righe H e metalli ionizzati	F	Prozione (Cane Mag.)
giallo	circa 6.000	righe H e metalli ionizzati e neutri	G	Sole
giallo arancione	3.000 ÷ 5.000	righe di metalli (calcio soprattutto)	K	Aldebaran (Toro)
rossastro	circa 3.000	righe dell'ossido di titanio	M	Antares (Scorpione)
rosso	2.000 ÷ 3.000	righe dell'ossido di zirconio	S	R (Gemelli)
rosso	circa 2.000	righe dei composti di carbonio	C	19 (Pesci)

Tab. 1.7 - Classificazione di alcune stelle secondo le osservazioni spettroscopiche.

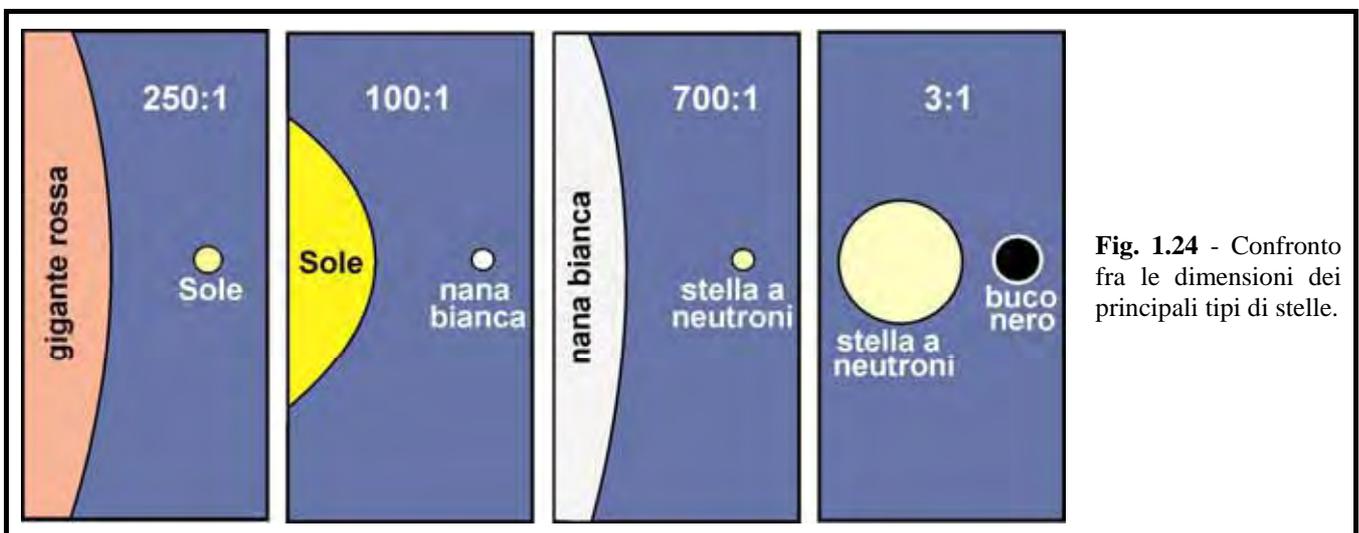
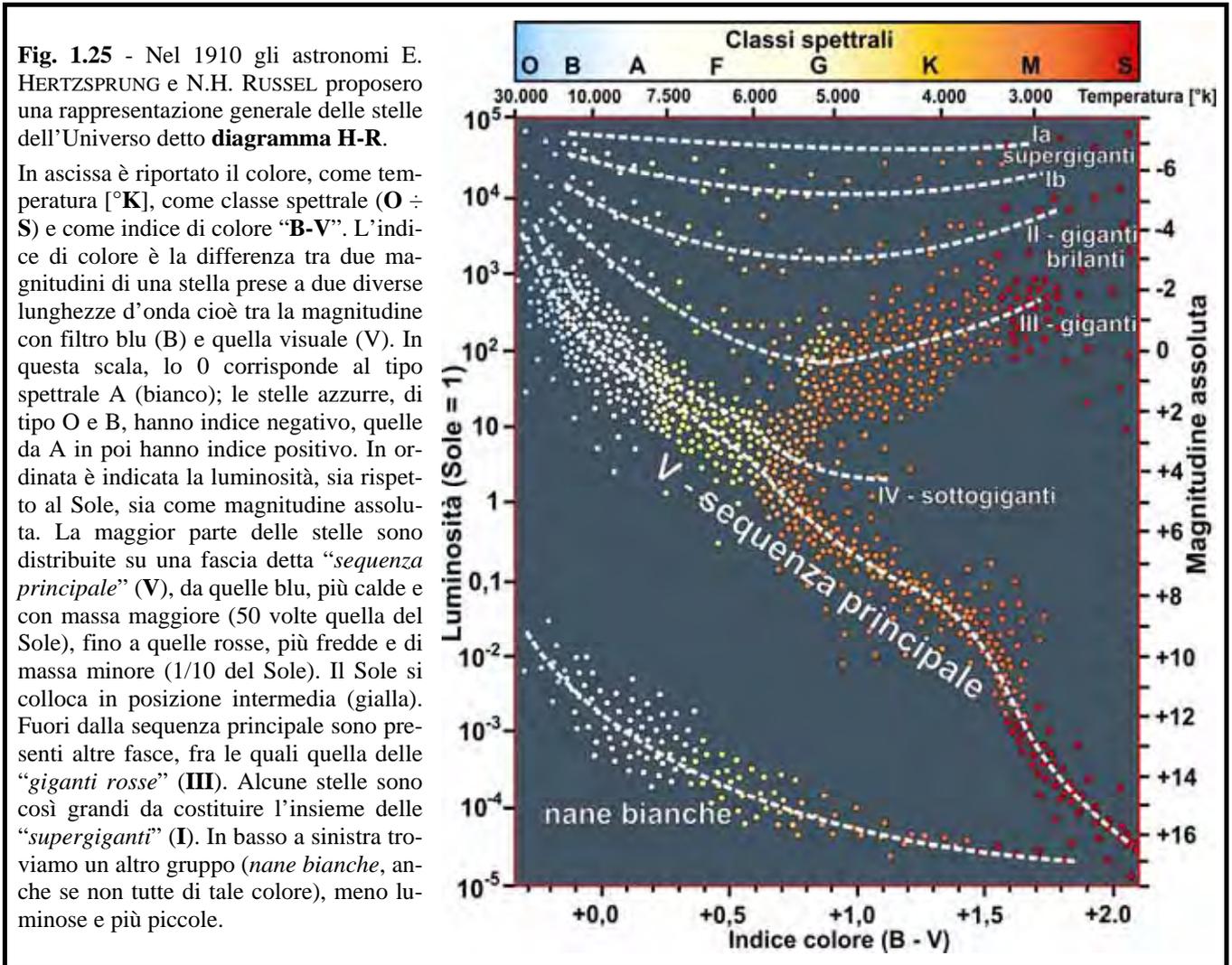


Fig. 1.24 - Confronto fra le dimensioni dei principali tipi di stelle.

Nel caso degli astri a maggiore densità, come le nane bianche, lo stato della materia è detto “degenerato”, in quanto gli edifici atomici, a causa delle pressioni elevatissime, sono presumibilmente crollati gli uni sugli altri; la conseguenza è una compattazione della materia a valori impossibili da immaginare sulla Terra. Le **stelle a neutroni** presentano densità più elevate (un miliardo di volte quella di una nana bianca), dimensioni di pochi chilometri, temperatura superficiale di milioni di gradi ed emissione di raggi X (1 cm³ della materia di quei corpi celesti ha una massa pari a 10⁸ m³ d’acqua, cioè un cubo con spigolo di quasi mezzo chilometro). I massimi valori di densità sono caratteristici dei **buchi neri**, corpi con dimensioni di poco inferiori a quelle delle stelle a neutroni, ma con massa ancora più grande, in grado di emettere un campo gravitazionale così intenso da sconvolgere le leggi della fisica; esso infatti sarebbe in grado di catturare le radiazioni dei corpi celesti vicini rendendo nero lo spazio intorno (**scheda 1.11**).



SCHEDA 1.1 - Orientamento sulla sfera celeste

Se immaginiamo di tagliare la sfera celeste con una superficie piana passante per il suo centro, si ottiene una circonferenza (per esempio l’equatore celeste rappresentato in **fig. 1.2**). Se il piano interseca la sfera parallelamente all’asse del mondo e sempre passante per il centro, si ottiene un **cerchio verticale**. Consideriamo una stella della quale si vuole determinare la posizione nella volta celeste rispetto ad un punto di osservazione **P** sulla Terra (**fig. 1.26**). Il cerchio verticale passante per lo zenit e il nadir di quel punto e per i poli celesti è detto **cerchio meridiano** (o *meridiano celeste*); esso e l’orizzonte astronomico di **P** rappresentano l’insieme di riferimento per la determinazione delle **coordinate astronomiche** di quella stella (**sistema azimutale** o **sistema orizzontale**). Consideriamo ora un altro cerchio verticale passante per lo zenit e il nadir di quel punto e per la stella. La sfera celeste appare tagliata secondo uno spicchio il cui angolo al centro (α) è la prima coordinata o “**azimut**”. L’angolo (β) compreso tra il piano che origina l’orizzonte astronomico e la linea di mira dal punto **P** verso la stella è la seconda coordinata o “**altezza**”. Quando equatore e orizzonte celesti non coincidono (condizione per un osservatore sui poli), la loro intersezione individua due punti, **Est** (oriente o levante) e **Ovest** (occidente o ponente), che segnano rispettivamente sull’orizzonte la posizione su cui sembra sorgere e tramontare un astro che percorra l’equatore celeste (**figg. 1.2 e 1.3**). I quattro punti Poli Nord e Sud e ed Est e Ovest sono detti **punti cardinali**.

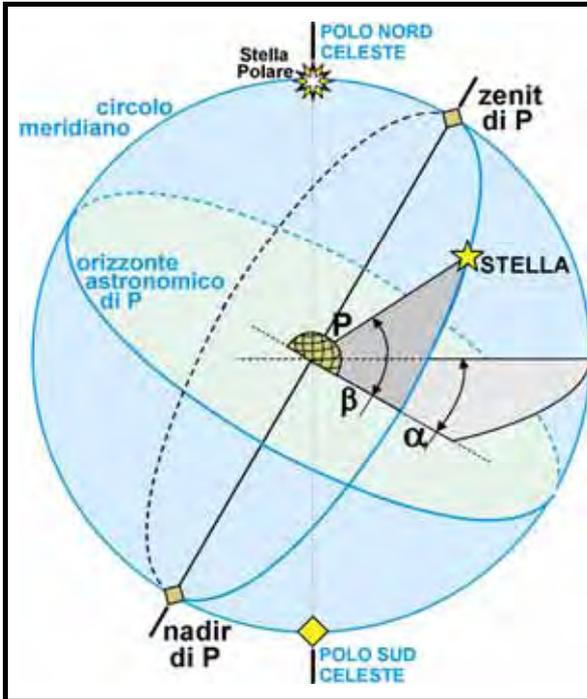


Fig. 1.26 - Le **coordinate astronomiche** di una stella nella sfera celeste, osservata da un punto **P** sulla Terra sono:

azimut (o *declinazione celeste*) = angolo al centro (α) fra il piano del circolo meridiano e quello che origina il circolo verticale passante per lo **zenit** e il **nadir** del punto di osservazione e per la stella;

altezza (o *ascensione retta*) = angolo (β) fra il piano che origina l'orizzonte astronomico e la direzione di osservazione verso la stella.

SCHEDA 1.2 - I contributi di KEPLERO, GALILEO e NEWTON

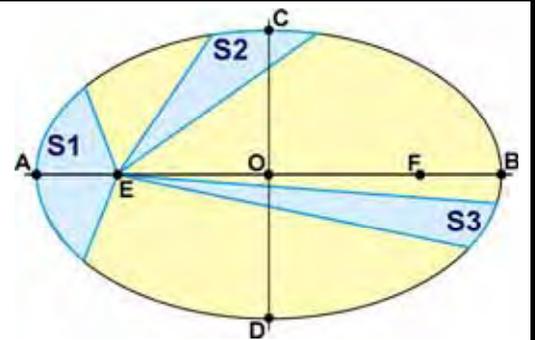
Dall'osservazione delle posizioni occupate nel cielo dai pianeti, Keplero formulò (1609 - 1618) tre leggi fondamentali.

Prima legge di Keplero: *i pianeti descrivono orbite ellittiche delle quali il Sole occupa uno dei fuochi.* La **fig. 1.27** illustra un'ellisse con i suoi parametri fondamentali. Allontanando i fuochi si ottengono ellissi più schiacciate (più *eccentriche*). Avvicinando i fuochi si ottengono ellissi meno eccentriche, fino a coincidere il cerchio. L'*eccentricità dell'ellisse* esprime il grado di "schiacciamento" di tale figura geometrica. La **tab. 1.3** riporta i valori delle eccentricità delle orbite dei pianeti, la distanza dei quali è anche espressa in *unità astronomiche* ottenute ponendo la distanza Sole - Terra pari a uno; questo sistema è dovuto a Keplero che, in tal modo, aggirò la difficoltà della determinazione delle distanze reali in chilometri. In altri termini lo scienziato boemo determinò le dimensioni relative delle diverse orbite planetarie, senza conoscere quelle assolute. Il Sole non si trova nel centro dell'ellissi, ma occupa la posizione di uno dei due fuochi. Di conseguenza la sua distanza da un determinato pianeta non è costante, ma oscilla da un minimo (**perielio**) ad un massimo (**afelio**). Come si può osservare dalla **tab. 1.3**, le orbite di Mercurio e di Plutone sono le più eccentriche, mentre quelle degli altri pianeti sono simili a cerchi.

Fig. 1.27 - Parametri fondamentali dell'ellisse:

- fuochi (E, F);**
- asse maggiore (AB);**
- asse minore (DC);**
- centro (O).**

L'orbita di un pianeta ha forma di un'ellisse dove il Sole occupa uno dei fuochi (es. **E**). Considerando tre intervalli di tempo uguali in tre momenti diversi della rivoluzione del pianeta, le aree dei settori (**S1**, **S2**, **S3**) sono equivalenti.



Seconda legge di Keplero: *i settori descritti dal raggio vettore, che congiunge il centro del Sole con il centro di un pianeta, hanno aree proporzionali ai tempi impiegati a percorrerle.* La **fig. 1.27** mostra l'orbita di un pianeta e il cammino percorso dallo stesso in intervalli di tempo di trenta giorni in tre archi di orbita diversi. Nei tre periodi di uguale durata, le aree in azzurro nella figura sono uguali. Analogo discorso sarebbe valido se si considerassero intervalli più lunghi o più brevi o punti diversi dell'orbita. Perché ciò possa verificarsi è necessario che il pianeta si muova più velocemente in prossimità del perielio rispetto a quando si trova vicino all'afelio.

Terza legge di Keplero: *i quadrati dei tempi (T) impiegati dai vari pianeti per percorrere l'intera orbita sono proporzionali ai cubi delle loro distanze medie (L) dal Sole* (legge geometrica espressa graficamente in **fig. 1.18**). Se osservassimo il Sistema Solare da un punto molto in alto sopra il Polo Nord terrestre, si vedrebbero i pianeti ruotare intorno al Sole in senso antiorario, ma non risulterebbe una rotazione "rigida". Un disco scuro, sulla cui superficie sono disposte macchie bianche, posto su un giradischi, ruota intorno ad un asse; le macchie più vicine a quest'ultimo si muovono più lentamente, mentre quelle più lontane più velocemente; tutte percorrono un giro completo nello stesso tempo. Invece nel Sistema Solare i pianeti lontani sono più "lenti" di quelli vicini:

$$\frac{L^3}{T^2} = \text{costante}$$

Nel 1610 **Galileo** diffuse un opuscolo (*Sidereus Nuncius*) sulle osservazioni effettuate con il cannocchiale da lui stesso inventato; descrisse i rilievi e le depressioni della superficie visibile della Luna, rivelò l'esistenza di stelle prima sconosciute, descrisse la Via Lattea come insieme di stelle. Negli anni successivi studiò il pianeta Saturno ed osservò le macchie solari. Il maggiore contributo dello scienziato italiano fu la scoperta delle fasi di Venere (simili a quelle lunari) e dei satelliti di Giove senza compiere alcun epiciclo; due fatti incoerenti con il sistema tolemaico che fu così definitivamente accantonato.

Un decisivo passo nel campo delle leggi dell'Universo fu compiuto da **Newton** con la scoperta della **legge di gravitazione universale** per interpretare le forze tra i corpi celesti, per spiegare la dinamica di un corpo che cade sulla superficie terrestre, del movimento di un proiettile, del moto della Luna, del Sole, di una stella, di un qualunque corpo che si trovi nell'Universo. Con Newton si conclude una fase della storia della ricerca scientifica che portò all'affermazione della scienza moderna

SCHEDA 1.3 - Prove della rotazione terrestre

La più classica esperienza a dimostrazione della rotazione terrestre risale al 1791, effettuata da GUGLIELMINI dalla Torre degli Asinelli a Bologna. La prova dimostra l'enunciato di Newton: i corpi cadendo si spostano dalla verticale in direzione Est. Questo fenomeno è dovuto alla rotazione della Terra da Ovest verso Est. Il corpo che si trova sulla torre partecipa alla rotazione terrestre assumendo la stessa velocità lineare del punto di partenza e mantenendola per inerzia durante la caduta. Essendo il punto di partenza più lontano dall'asse terrestre del punto di arrivo (altezza della torre), il corpo ha una maggiore velocità lineare di rotazione rispetto alla base (ruota con maggiore velocità periferica e cade più ad Est; **fig. 1.28**).

Altra prova è quella effettuata nel 1851 da FOUCAULT nel Pantheon di Parigi. Essa consiste nell'osservare lo spostamento del piano di oscillazione di un pendolo, rispetto a riferimenti fissi al suolo. Egli sospese un pendolo lungo 68 m e sufficientemente pesante (sfera di 30 kg) affinché le oscillazioni durassero alcune ore. Al peso era applicata un'asta che sfiorava il terreno, in grado di tracciare dei segni sulla sabbia che lo ricopriva. Il piano di oscillazione del pendolo è fisso nello spazio; quindi l'apparente rotazione del piano, registrata dall'asta sulla sabbia, dopo alcune ore di oscillazione, rivelava l'effettivo moto di rotazione terrestre (**fig. 1.29**). Al polo il piano di oscillazione copre un angolo giro in 24 ore, dato che ogni punto dell'orizzonte percorre in un giorno un giro completo intorno alla verticale. All'equatore il fenomeno non avviene perché il piano dell'orizzonte è parallelo all'asse terrestre.

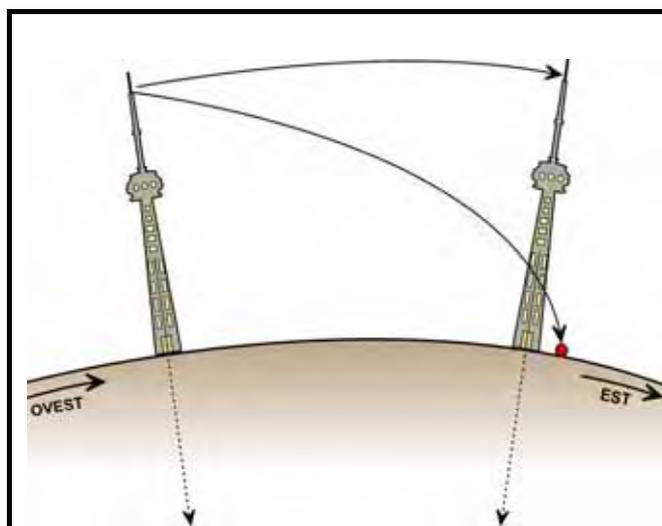


Fig. 1.28 - Esperienza di Guglielmini. A causa della rotazione terrestre i gravi cadendo si spostano verso Est

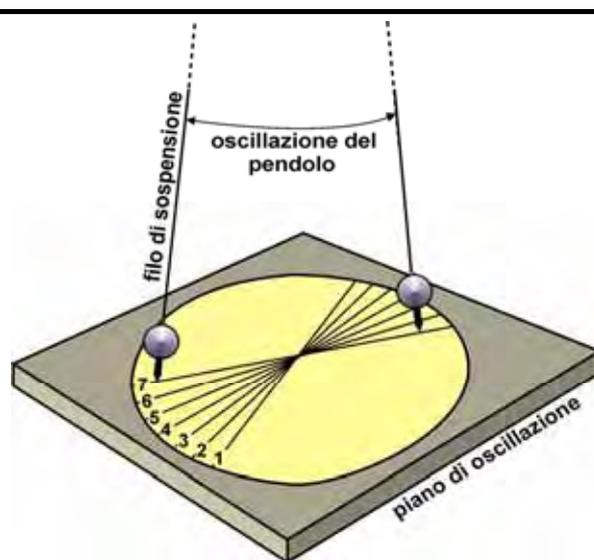


Fig. 1.29 - Esperienza di Foucault. Se si segnano su un pavimento i punti tra cui il pendolo oscilla in tempi successivi, il piano di oscillazione sembra spostarsi progressivamente, come se ruotasse in senso orario intorno ad un asse verticale. In realtà è il pavimento che ruota in senso antiorario, seguendo il movimento di rotazione della Terra.

Affascinante è la descrizione di Umberto ECO nelle prime pagine del suo libro *“Il pendolo di Foucault”* (Bompiani, 1988):
Fu allora che vidi il pendolo.

La sfera, mobile all'estremità di un lungo filo fissato alla volta del coro, descriveva le sue ampie oscillazioni con isocrona maestà. Io sapevo (ma chiunque avrebbe dovuto avvertire nell'incanto di quel placido respiro) che il periodo era regolato dal rapporto tra la radice quadrata della lunghezza del filo e quel numero π che, irrazionale alle menti sublunari, per divina ragione lega necessariamente la circonferenza al diametro di tutti i cerchi possibili, così che il tempo di quel vagare di una

sfera dall'uno all'altro polo era effetto di una arcana cospirazione tra le più interporali delle misure, l'unità del punto di sospensione, la dualità di una astratta dimensione, la natura ternaria di π , il tetragono segreto della radice, la perfezione del cerchio. Ancora sapevo che sulla verticale del punto di sospensione, alla base, un dispositivo magnetico, comunicando il suo richiamo a un cilindro nascosto nel cuore della sfera, garantiva la costanza del moto, artificio disposto a contrastare le resistenze della materia, ma che non si opponeva alla legge del pendolo, anzi le permetteva di manifestarsi, perchè nel vuoto qualsiasi punto materiale pesante, sospeso all'estremità di un filo inestensibile e senza peso, che non subisse la resistenza dell'aria e non facesse attrito col suo punto d'appoggio, avrebbe oscillato in modo regolare per l'eternità.

La sfera di rame emanava pallidi riflessi cangianti, battuta com'era dagli ultimi raggi di sole che penetravano dalle vetrate. Se, come un tempo, avesse sfiorato con la sua punta uno strato di sabbia umida disteso sopra il pavimento del coro, avrebbe disegnato, a ogni oscillazione, un solco leggero sul suolo, mutando infinitesimalmente di direzione ad ogni istante, si sarebbe allargato sempre più in forma di breccia, di vallo, lasciando indovinare una simmetria raggiata - come lo scheletro di una mandala, la struttura invisibile di un pentaculum, una stella, una mistica rosa.

... il pendolo smorzava la propria velocità a un'estremità del piano di oscillazione, per ricadere indolente verso il centro, acquistare velocità a metà del suo percorso, sciabolare confidente nell'occulto quadrato delle forze che ne segnava il destino. Se fossi rimasto a lungo, resistente al passare delle ore, a fissare quella testa d'uccello, quell'apice di lancia, quel cimiero rovesciato, mentre disegnava nel vuoto le proprie diagonali, sfiorando i punti opposti della sua astigmatica circonferenza, sarei stato vittima di un'illusione fabulatoria, perchè il pendolo mi avrebbe fatto credere che il piano di oscillazione avesse compiuto una completa rotazione, tornando al punto di partenza, in trentadue ore, descrivendo un'ellisse appiattita - l'ellisse ruotando intorno al proprio centro con una velocità angolare uniforme, proporzionale al seno della latitudine. Come avrebbe ruotato se il punto fosse stato fissato al sommo della cupola del Tempio di Salomone? Forse i cavalieri avevano provato anche laggiù. Forse il calcolo, il significato finale, non sarebbe cambiato. Forse la chiesa abbaziale di Saint-Martin-des-Champs era il vero tempio. Comunque l'esperienza sarebbe stata perfetta solo al Polo, unico luogo in cui il punto di sospensione sta sul prolungamento dell'asse di rotazione terrestre e dove il pendolo realizzerebbe il suo ciclo apparente in ventiquattro ore.

Ma non era questa deviazione dalla legge, che peraltro la legge prevedeva, non era questa violazione di una misura aurea che rendeva meno mirabile il prodigio. Io sapevo che la Terra stava ruotando, e io con essa, e Saint-Martin-des-Champs e tutta Parigi con me, e insieme ruotavamo sotto il pendolo che in realtà non cambiava mai la direzione del proprio piano, perchè lassù, da dove esso pendeva, e lungo l'infinito prolungamento ideale del filo, in alto verso le più lontane galassie, stava, immobile per l'eternità, il Punto Fermo. La Terra ruotava, ma il luogo ove il filo era ancorato era l'unico punto fisso dell'Universo.

Dunque non era tanto alla Terra che si rivolgeva il mio sguardo, ma lassù, dove si celebrava il mistero dell'immobilità assoluta. Il pendolo mi stava dicendo che, tutto muovendo, il globo, il Sistema Solare, le nebulose, i buchi neri e i figli tutti della grande emanazione cosmica, dai primi eoni alla materia più vischiosa, un solo punto rimaneva, perno, chiavarda, aggancio ideale, lasciando che l'Universo muovesse intorno a sé. E io partecipavo ora di quell'esperienza suprema, io che pure mi muovevo con tutto e col tutto, ma potevo vedere Quello, il Non Movente, la Rocca, la Garanzia, la caligine luminosissima che non è corpo, non ha figura, forma, peso, quantità o qualità, e non vede, non sente, né cade sotto la sensibilità, non è in un luogo, in un tempo o in uno spazio, non è anima, intelligenza, immaginazione, opinione, numero, ordine, misura, sostanza, eternità, non è né tenebra né luce, non è errore e non è verità.

Mi scosse un dialogo, preciso e svogliato, tra un ragazzo con gli occhiali e una ragazza che purtroppo non li aveva.

"È il pendolo di Foucault" diceva lui. "Primo esperimento in cantina nel 1851, poi all'Observatoire e poi sotto la cupola del Panthéon, con un filo di sessantasette metri e una sfera di ventotto chili. Infine dal 1855 è qui, in formato ridotto e pende da quel buco, a metà della crociera".

Lei: "E che fa, penzola e basta?"

Lui: "Dimostra la rotazione della Terra. Siccome il punto di sospensione rimane fermo..."

Lei: "E perchè rimane fermo?"

Lui: "Perché un punto... come dire... nel suo punto centrale, bada bene, ogni punto che stia proprio nel mezzo dei punti che tu vedi, bene, quel punto - il punto geometrico - tu non lo vedi, non ha dimensioni e ciò che non ha dimensioni non può andare né a destra né a sinistra, né in basso né in alto. Quindi non ruota. Capisci? Se il punto non ha dimensioni, non può neppure girare intorno a se stesso. non ha neanche se stesso..."

Lei: "Nemmeno se la Terra gira?"

Lui: "La Terra gira, ma il punto non gira. Se ti piace, è così, se no ti gratti. Va bene?"

Lei: "Affari suoi".

SCHEDA 1.4 - Altri movimenti della Terra

L'asse terrestre non rimane sempre parallelo a se stesso, ma si sposta molto lentamente fino a compiere, in un periodo di circa 26.000 anni, un movimento detto **moto conico dell'asse**, paragonabile a quello di una trottola quando inizia a diminuire la sua velocità di rotazione (**fig. 1.30**). Conseguenza di tale moto è la **precessione degli equinozi**: ogni anno l'equinozio di primavera si verifica con circa 20 minuti di anticipo rispetto all'anno precedente. La direzione del Nord, che attualmente è data dalla Stella Polare, fra 12.000 anni sarà data dalla stella Vega. Fra 13.000 anni l'asse di rotazione di rotazione avrà inclinazione opposta a quella attuale, con conseguente inversione delle stagioni. Inoltre il cono descritto presenta una superficie laterale leggermente ondulata (**nutazione**) conseguenza delle attrazioni gravitazionali fra Terra, Luna e Sole.

L'angolo di inclinazione dell'asse di rotazione terrestre rispetto alla normale al piano dell'orbita intorno al Sole non è costantemente pari a $23^{\circ} 5'$, ma subisce lievi oscillazioni, da un minimo di $21^{\circ} 55'$ ad un massimo di $24^{\circ} 20'$ in un periodo di 40.000 anni. MILANKOVITCH (1930) riuscì a correlare questi movimenti con le variazioni dell'insolazione della superficie terrestre e quindi ai mutamenti climatici all'origine delle ultime grandi glaciazioni. Esistono altri movimenti millenari della Terra, anch'essi dipendenti dai campi gravitazionali dei corpi del Sistema Solare. Questi, a causa delle loro mutevoli posizioni nello spazio, producono numerose perturbazioni sul movimento di rivoluzione della Terra contribuendo, anche se più modestamente, alle variazioni della posizione e della forma dell'orbita terrestre. Uno di questi movimenti è la **variazione dell'eccentricità dell'orbita**, ossia nella variazione del rapporto tra la distanza del Sole dal centro dell'orbita e la lunghezza del semiasse maggiore di quest'ultima.

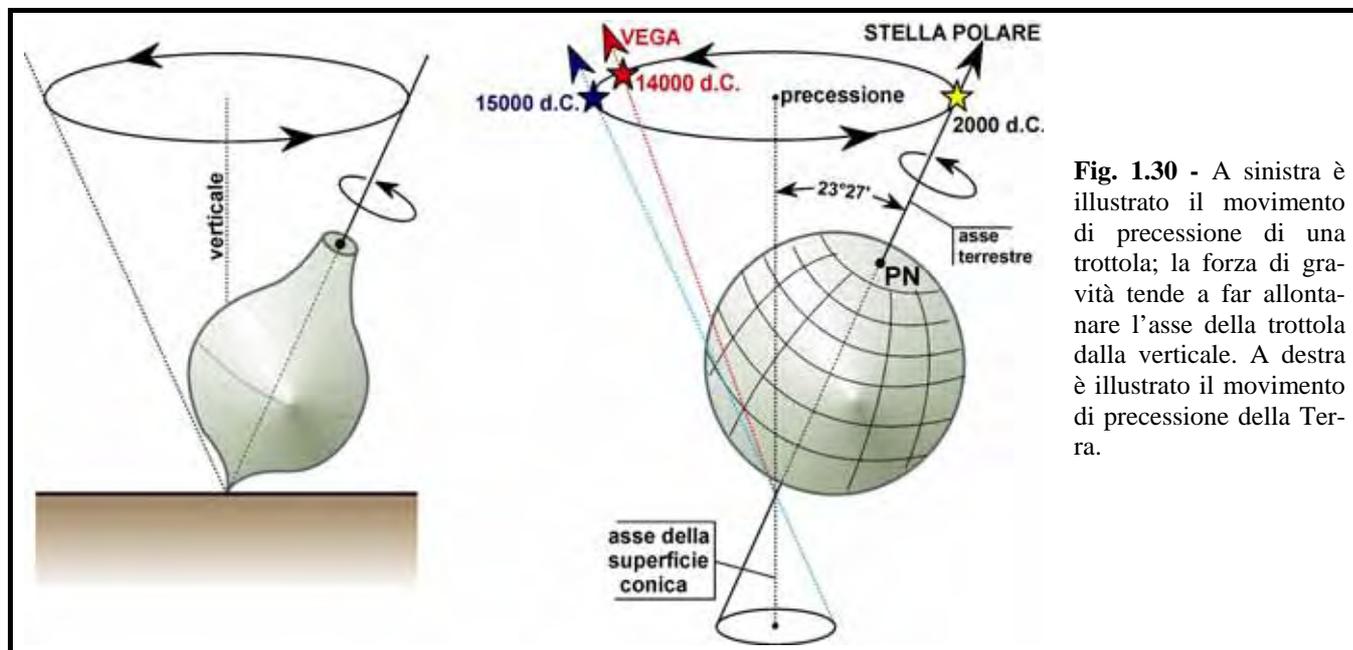


Fig. 1.30 - A sinistra è illustrato il movimento di precessione di una trottola; la forza di gravità tende a far allontanare l'asse della trottola dalla verticale. A destra è illustrato il movimento di precessione della Terra.

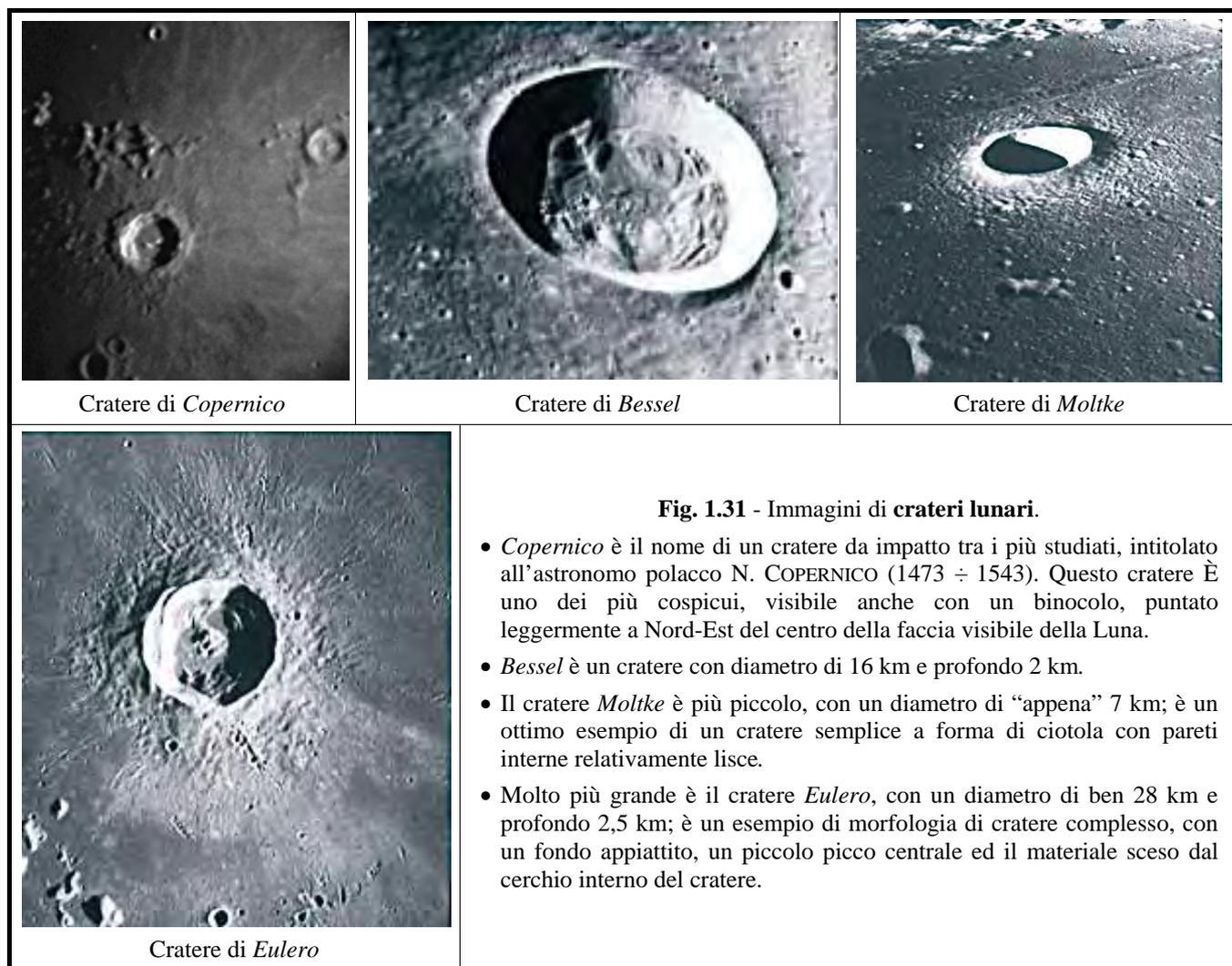
SCHEDA 1.5 - Il calendario

Le misure più recenti dimostrano che in un anno vi sono 365,242194..... giorni con un numero di decimali probabilmente senza fine. Per scopi pratici è più comodo dividere l'anno in un numero intero di giorni: 365. In questo modo per ogni giro di rivoluzione della Terra intorno al Sole si determina un errore di 0,242294..... giorni; dopo dieci anni l'errore diventa di 2,42294..... giorni e dopo cento anni l'errore è di quasi un mese. Per risolvere il problema Giulio CESARE (46 a.C.) introdusse un metodo che consisteva nel fare un anno (**bisestile**) di 366 giorni ogni quattro, aggiungendo un giorno al mese di febbraio (passando così da 28 a 29). Questo calendario viene detto **giuliano** e determina ancora un errore di 0,0078 giorni per ogni anno (poco più di 11 minuti). Dato che il calendario di Cesare è stato in vigore dal 46 a.C., al 1500 d.C., si era accumulato un errore di 12 giorni. Papa GREGORIO XIII, nel 1582, propose un sistema un po' più complesso (detto **gregoriano**). Esso partiva dal calendario giuliano, omettendo 3 anni bisestili ogni 4 secoli (il 1900 sarebbe stato un anno bisestile per il calendario giuliano, ma non per quello gregoriano). Il sistema che stiamo attualmente usando è quello gregoriano, ma esso determina ancora un errore di 0,0003 giorni per ogni anno e tra 40.000 anni si accumulerà un errore di 12 giorni.

SCHEDA 1.6 - Crateri lunari

I crateri lunari (i più grandi sono osservabili con un binocolo) sono una caratteristica dominante della superficie del nostro satellite (**fig. 1.31**). Secondo una teoria, poco dopo la formazione della Luna, al suo interno, a causa del decadimento di materiali radioattivi, si sprigionò una grande quantità di energia in grado di fondere la superficie. Nelle porzioni più profonde si formarono masse di materiali fusi misti a gas che si aggregarono in gigantesche bolle. Queste, premendo sotto la superficie provocarono tumescenze che, giunte al massimo, esplosero liberando gas nello spazio e lasciando numerosi crateri, sul bordo esterno dei quali la lava scivolò producendo i lunghi raggi ora visibili dalla Terra. Un'altra teoria sostiene che gigantesche meteoriti avrebbero colpito la superficie della Luna quando questa era ancora parzialmente fusa sotto una sottile crosta già solidificata. Gli urti provocarono il cedimento di quella crosta facendo "schizzare" all'esterno i sottostanti materiali fusi con conseguente formazione dei crateri con i picchi centrali. Recenti fotografie hanno permesso di rilevare, sulla superficie della Luna, solchi sinuosi simili alle incisioni dei fiumi sulla superficie terrestre; forse sulla Luna era un tempo presente dell'acqua e una atmosfera. Devono probabilmente essere esistiti vulcani e gli impatti con meteoriti devono essersi verificati, a causa dell'assenza di atmosfera, con maggior frequenza e con maggiori conseguenze rispetto al nostro pianeta. Le diverse ipotesi che descrivono l'insieme dei fenomeni che si sono verificati e che potrebbero ancora verificarsi, non sono fra loro in contraddizione, ma ugualmente importanti e complementari nella determinazione dell'aspetto della superficie lunare.

Le forme superficiali della Luna e le teorie sui fenomeni che le hanno determinate permettono di formulare diverse ipotesi sulla sua origine. Un tempo si riteneva che la Luna si fosse staccata, per l'attrazione solare, da una Terra anticamente ancora abbastanza plastica (perché più calda), lasciandovi una gigantesca cicatrice in corrispondenza dell'oceano Pacifico. Oggi sappiamo che i meccanismi di formazione di quell'oceano sono diversi. I campioni dei materiali lunari portati sulla Terra, in occasione dei viaggi spaziali compiuti negli anni '70 (**fig. 1.11**), sono stati analizzati; è risultato che la loro composizione è diversa da quella delle rocce superficiali della Terra, a conferma che la Luna non è una massa che si è staccata dal nostro pianeta. È probabile che i due corpi si siano formati indipendentemente, mentre si formava il Sistema Solare.



SCHEDA 1.7 - Il mese sinodico

La **fig. 1.32** mostra il sistema Sole/Terra/Luna visto dall'alto. A sinistra la Terra si trova in una certa posizione rispetto al Sole, mentre la Luna si trova nella posizione **P** rispetto alla Terra. Dopo un mese sidereo (27 giorni, 7 ore e 43 minuti a destra) il nostro satellite avrà compiuto una rivoluzione completa ritrovandosi nuovamente nella posizione **P** rispetto alla Terra, ma questa non è un riferimento fisso perché nel frattempo ha compiuto un tratto della sua orbita intorno al Sole ruotando di un angolo β . Pertanto la Luna, per riportarsi nella situazione di partenza rispetto al sistema Terra-Sole, deve ancora compiere un tratto della sua orbita (per giungere **P'**) pari allo stesso angolo di rotazione β in un tempo di poco più di due giorni. Affinché il satellite ritorni all'identico allineamento Sole-Terra-Luna, occorre un periodo di 29 giorni, 12 ore e 44 minuti, denominato “**rivoluzione sinodica**” o “**mese sinodico**”. Questo fatto spiega perché la Luna ogni sera sorge con cinquanta minuti di ritardo rispetto la sera precedente.

SCHEDA 1.8 - Descrizione dei pianeti

MERCURIO. La superficie è simile a quella lunare con crateri e mari; si può quindi supporre che la sua storia non sia molto diversa da quella della Luna; inoltre anche il pianeta è sprovvisto di atmosfera. Data la sua vicinanza al Sole, la temperatura superficiale dell'emisfero esposto raggiunge valori di circa 400 °C (punto di fusione del piombo). Nell'emisfero in ombra, la temperatura scende a - 170 °C.

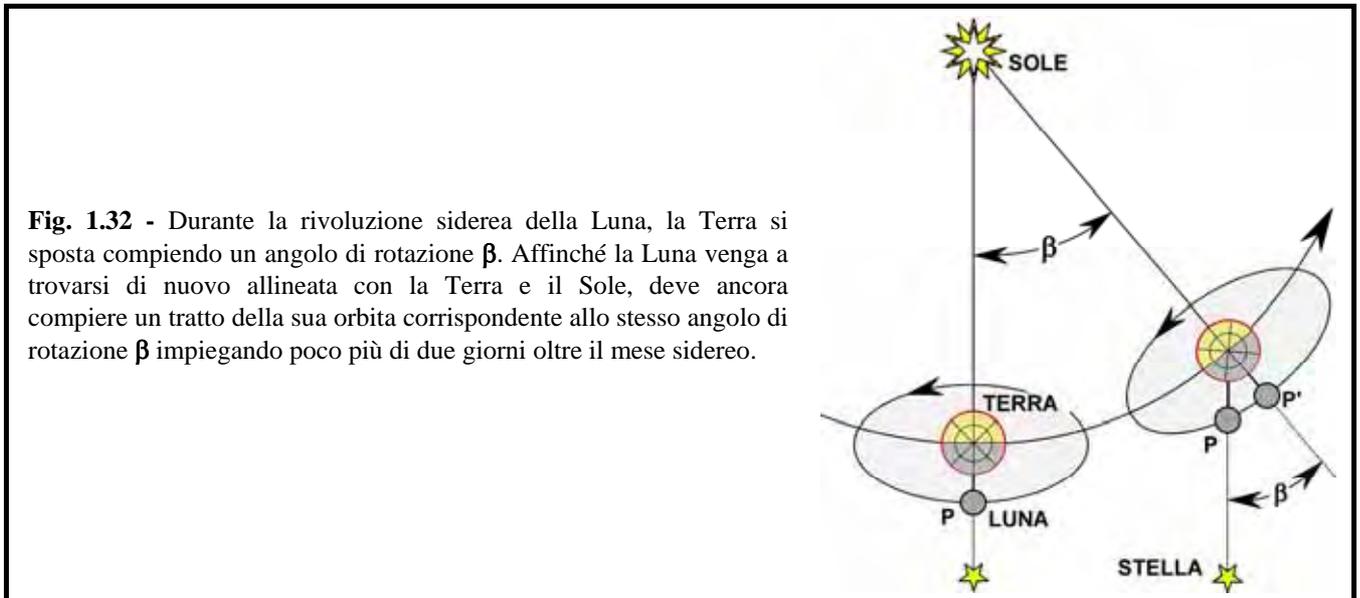


Fig. 1.32 - Durante la rivoluzione siderea della Luna, la Terra si sposta compiendo un angolo di rotazione β . Affinché la Luna venga a trovarsi di nuovo allineata con la Terra e il Sole, deve ancora compiere un tratto della sua orbita corrispondente allo stesso angolo di rotazione β impiegando poco più di due giorni oltre il mese sidereo.

VENERE. La superficie è ricoperta da nubi giallastre in movimento. L'atmosfera è formata quasi interamente da CO_2 e da nubi, forse formate da acido solforico, molto alte sulla superficie del pianeta ($25 \div 80$ km). La temperatura superficiale si aggira sui 480°C , mentre la pressione atmosferica è 90 volte maggiore di quella terrestre. Le sonde spaziali inviate sulla superficie di quel pianeta hanno trasmesso dati per poco tempo; sembra infatti che cada una pioggia di acido solforico bollente. Su Venere vi sono grandi crateri, dovuti probabilmente all'impatto di meteoriti, ma con bordi molto appiattiti, forse per l'erosione dovuta ai venti e all'aggressività degli agenti chimici dell'atmosfera. Dalle immagini delle sonde spaziali la superficie di Venere appare ricoperta di ciottoli di varie dimensioni. Questo pianeta ruota su se stesso in senso contrario rispetto agli altri



Fig. 1.33 - Immagini dei **planeti del Sistema Solare** (vedi anche **fig. 1.19**). Le dimensioni relative sono molto approssimativamente rappresentative; non sono in perfetta scala. Giove è il più grande, con massa 318 volte più grande di quella della Terra, superiore a quella della somma di tutti gli altri planeti. Mercurio, tra i più piccoli, è quello più vicino al Sole ($58 \cdot 10^6$ km); Plutone, il più piccolo ($\sim 1/10$ della massa della Terra), è il più distante (quasi $6.000 \cdot 10^6$ km).

MARTE. È il più simile alla Terra; sono simili i periodi di rivoluzione e di rotazione e l'inclinazione dell'asse di rotazione sul piano dell'orbita (sono presenti le stagioni, come documentato dalla formazione di calotte di ghiaccio sui poli e loro evaporazione nella stagione estiva). L'atmosfera, molto rarefatta, è costituita prevalentemente da CO_2 con tracce di azoto, argo e vapore d'acqua; la pressione sulla superficie è $1/100$ di quella terrestre a livello del mare. In tali condizioni l'acqua non esiste allo stato liquido, ma passa direttamente dallo stato gassoso a quello solido e viceversa. Sono presenti tenui nebbie e nubi simili a quelle terrestri. Le immagini delle sonde spedite su Marte hanno mostrato paesaggi simili a quelle dei nostri deserti: distese di sabbia rossastra con massi e ciottoli dello stesso colore. Questa dominante di colore sembra sia dovuta alla presenza di ossidi di ferro (ruggine) molto abbondanti. Sono presenti crateri dovuti all'impatto di meteoriti, ma in numero decisamente inferiore rispetto a quelli lunari, in parte erosi dai venti o riempiti di sabbia dagli stessi o cancellati da eruzioni

vulcaniche che, in passato, dovevano essere frequenti. Ora i vulcani sono spenti; uno di essi ha un diametro di 600 km e una altezza di 25 km. Sulla superficie sono presenti enormi fratture, probabilmente formate in seguito a terremoti molto intensi. Vi sono anche formazioni morfologiche simili a letti di fiumi prosciugati che potrebbero far pensare che un tempo su Marte vi fosse l'acqua; allora la temperatura doveva essere più elevata per consentire all'acqua di esistere anche allo stato liquido, mentre attualmente le temperature massime superficiali non superano i - 20 °C. Le sonde che si sono posate su Marte non hanno rivelato tracce di vita; ma ulteriori ricerche sono ancora necessarie per verificare se forme elementari di organismi sono esistite in passato. Tra l'orbita di Marte e quella di Giove ruotano migliaia di asteroidi; forse potrebbero essere frammenti dello scontro distruttivo di due pianeti o un pianeta mai nato.

GIOVE. Ruota più rapidamente all'equatore rispetto ai poli; ciò significa che la sua superficie è fluida. Forse le porzioni profonde di Giove contengono materiali solidi in cui è presente molto ferro. Questo nucleo sembra "avvolto" da un "oceano" di idrogeno liquido ed elio profondo ben 70.000 km (più di 5 volte il diametro della Terra). Il tutto sembra avvolto da una atmosfera composta da idrogeno ed elio con spessore di 1.000 km, con temperatura inferiore a - 100 °C e con presenza di nubi costituite da piccoli cristalli di ammoniaca e di acqua. La grande velocità di rotazione (poco più di 9 ore) produce venti molto intensi e dalla dinamica molto complicata; tali venti sembrano siano all'origine delle caratteristiche bande di Giove.

SATURNO, URANO, NETTUNO e PLUTONE. Hanno strutture interne e atmosfere analoghe a quelle di Giove. Il primo è caratteristico per i suoi *anelli*, larghi circa 270.000 km e formati da frammenti di ghiaccio e da altre particelle ricoperte di ghiaccio, delle dimensioni di pochi centimetri, rotanti intorno al pianeta. Recentemente è stato scoperto che anche Urano possiede un sistema di anelli, seppure meno appariscenti. Di Plutone si sa molto poco, dato che è il più lontano nel Sistema Solare. La sua orbita interseca in due punti quella di Nettuno, tanto che un tempo alcuni astronomi ipotizzavano che esso fosse un suo satellite.

SCHEDA 1.9 - L'Universo in espansione

Con il moto di rivoluzione della Terra intorno al Sole, alcune stelle "fisse" mutano, seppure di pochissimo, le loro posizioni rispetto alle altre; quindi esse non sono esattamente "fisse"! Ciò perché sono relativamente vicine alla Terra. Mentre il nostro pianeta ruota intorno al Sole, vediamo queste stelle più vicine da diverse posizioni, sullo sfondo costituito dalle stelle più lontane. Questo stesso effetto è osservabile anche in viaggio lungo una strada aperta: le posizioni relative degli alberi vicini ci sembrano mutare sullo sfondo di ciò che si trova molto più lontano all'orizzonte. Questa variazione nella posizione relativa è detta "*parallasse*". Nel caso delle stelle ci permette di misurare direttamente la loro distanza dalla Terra (**fig. 1.23**).

Sappiamo che la stella più vicina, Proxima Centauri (**tab. 1.6**), si trova a circa 4 anni-luce (quasi $4 \cdot 10^{13}$ km) di distanza. La maggior parte delle stelle visibili a occhio nudo si trova entro un raggio di qualche centinaio di anni-luce (il Sole a "soli" otto minuti-luce). Le stelle visibili sono distribuite in tutto il cielo notturno, ma sono particolarmente concentrate nella Via Lattea, galassia di cui fa parte anche il Sole, una comune stella gialla, di media grandezza, collocata in posizione piuttosto marginale.

La concezione moderna dell'Universo risale al 1924, quando l'astronomo americano Edwin HUBBLE dimostrò che la Via Lattea non era l'unica galassia, ma ne esistono molte altre, separate da immensi tratti di spazio vuoto. Per poterlo dimostrare, Hubble doveva determinare le distanze di queste altre galassie dalla Terra. Esse però sono talmente lontane che, a differenza delle stelle vicine, sembrano occupare realmente delle posizioni fisse nella volta celeste, quindi senza possibilità di utilizzare la parallasse. Hubble fu costretto a ricorrere a metodi indiretti.

Una indicazione della distanza di una stella è data dalla sua luminosità. Tuttavia la luminosità apparente di una stella non dipende solo dalla distanza, ma anche dalla quantità di luce che essa irraggia (luminosità reale o assoluta). Una stella con luce più tenue, se sufficientemente vicina, risplende nel cielo più di una stella più luminosa di una galassia lontana. Pertanto, a partire dalla luminosità apparente (**m**) occorre conoscere la luminosità assoluta (**M**) in funzione della distanza (**d**) secondo la relazione che abbiamo visto al **par. 1.8**.

Hubble notò che le stelle vicine, di cui è facile determinare "M" e "d" potevano essere classificate in base al tipo di luce di emissione; lo stesso tipo di stelle ha sempre la stessa luminosità assoluta (**fig. 1.25**). Egli concluse che se trovassimo questi tipi di stelle in una galassia lontana, potremmo supporre che esse abbiano la stessa luminosità assoluta delle stelle simili a noi vicine: sarebbe quindi possibile calcolare la distanza di quella galassia. Applicando questo procedimento per un certo numero di stelle appartenenti alla medesima galassia, si nota che i calcoli danno sempre la stessa distanza, ciò che dimostra l'attendibilità della stima. In questo modo Hubble calcolò le distanze di nove diverse galassie.

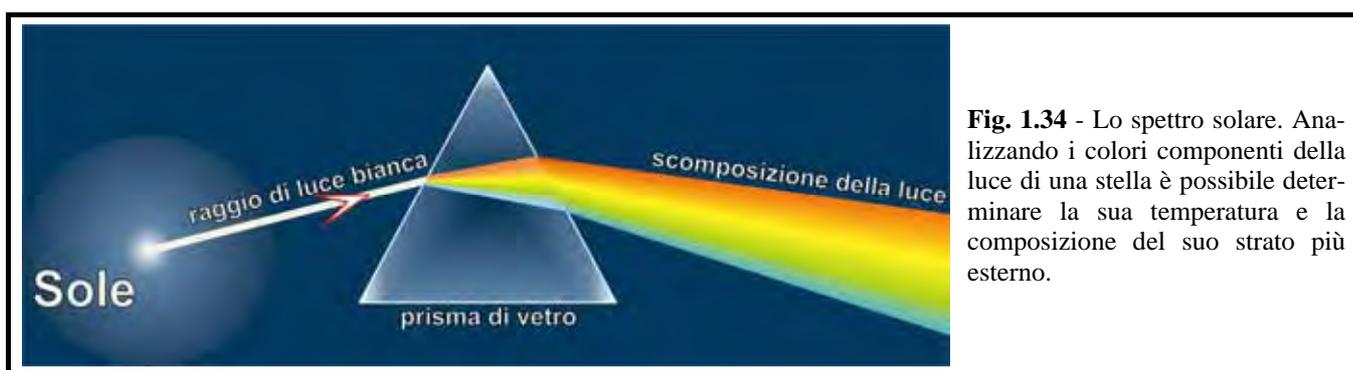


Fig. 1.34 - Lo spettro solare. Analizzando i colori componenti della luce di una stella è possibile determinare la sua temperatura e la composizione del suo strato più esterno.

Le stelle visibili a occhio nudo sono circa 6.000, appena lo 0,0001 per cento circa delle stelle presenti nella nostra galassia; ma questa è solo una fra più di un centinaio di miliardi di galassie che possono essere viste attraverso i moderni telescopi, ciascuna delle quali contiene in media qualche centinaio di miliardi di stelle. Se ogni stella fosse un granello di sale, un cucchiaino da caffè basterebbe per raccogliere tutte quelle visibili a occhio nudo, ma tutte le stelle dell'Universo riempirebbero una sfera con diametro superiore a 12 km.

Ci sono molti tipi di stelle, distinguibili dal colore della loro luce. NEWTON scoprì che se la luce del Sole passa attraverso un pezzo di vetro di sezione triangolare (prisma), essa si scompone nei propri colori componenti, come in un arcobaleno (**fig. 1.34**). Le intensità relative dei diversi colori emessi da una determinata fonte di luce costituiscono il suo spettro. Puntando un telescopio su una singola stella o su una galassia, possiamo osservare lo spettro della sua luce. Conviene comunque ricordare che lo spettro della luce visibile è solo una piccola parte di quello comprensivo di tutti i tipi di onde elettromagnetiche (**tab. 1.8**), con lunghezze d'onde tra un minimo di 4.000 Å (rosso) ed il massimo di 7.000 Å (violetto). L'Å [Å] è una unità di misura di lunghezza pari alla centesima di milionesima parte di un centimetro (10^{-8} cm = 10^{-6} m). Altra unità di misura spesso usata per indicare le lunghezze d'onda è il nanometro [nm] per cui 1 nm = 10^{-9} m = 10^{-6} Å.

Tab. 1.8 - Classificazione delle onde elettromagnetiche in funzione della *lunghezza d'onda* "λ" [m] della *frequenza* "ν", espressa in Hertz [Hz], cioè numero di oscillazioni al secondo e dell'*energia* "E", espressa in elettronvolt [ev]. Le onde radio sono quelle più "lunghe", con lunghezza d'onda da meno di un metro fino a centinaia di chilometri. Molto più "corte" sono quelle del visibile (intorno ad 1/10 di 1/1000 di millimetro). Le più corte sono i raggi γ, con lunghezza d'onda fino ad 1/1000 di miliardesimo di millimetro.

L'elettronvolt [ev] è una unità di misura dell'energia estremamente piccola, utilizzata per valutare gli scambi energetici a livello atomico (cfr. **scheda 1.10**). Senza entrare nei dettagli è interessante notare i valori riportati per ciascun tipo di onda come rapporti tra i corrispondenti livelli. Per esempio le onde del visibile sono anche 10.000 volte più energetiche delle microne, ma a loro volta sono migliaia o anche decine di migliaia più "deboli" dei raggi X.

Tutte le onde elettromagnetiche viaggiano, nel vuoto, alla stessa velocità della luce e cioè $c \cong 3 \cdot 10^5$ km/s. Con tale velocità si potrebbe percorrere il giro del Mondo 10 volte in un secondo.

"λ" [m]	"ν" [Hz]	"E" [ev]	Tipo di onde	Descrizione
$10^5 \div 10^1$	$10^3 \div 10^9$	$10^{-11} \div 10^{-5}$	Radio	Generate da apparecchi elettronici e impiegate nelle trasmissioni televisive e radio. Sono divise in bande di frequenze a seconda dell'uso nei sistemi di telecomunicazione.
$10^{-3} \div 10^{-3}$	$10^9 \div 10^{11}$	$10^{-5} \div 10^{-3}$	Microonde	Generate da apparecchiature elettroniche e utilizzate nei radar, nei sistemi di comunicazione via satellite, per riscaldare cibi (forno a microonde).
$10^{-3} \div 10^{-6}$	$10^{11} \div 10^{14}$	$10^{-3} \div 10^0$	Infrarosso	Prodotte da molecole e corpi caldi. Con apparecchi sensibili ai raggi infrarossi si "vedono" al buio animali a sangue caldo. Gli infrarossi sono usati nell'industria, in medicina, in astronomia,...
$10^{-6} \div 10^{-7}$	$10^{14} \div 10^{15}$	$10^0 \div 10^1$	Visibile (fig. 1.34)	È una stretta banda di lunghezze d'onda (dal violetto al rosso) alle quali il nostro occhio è sensibile. È prodotta da aggiustamenti degli elettroni interni di atomi e di molecole.
$10^{-7} \div 10^{-8}$	$10^{15} \div 10^{16}$	$10^1 \div 10^2$	Ultravioletto (UV)	Prodotte da atomi e molecole sottoposti a scariche elettriche. Il Sole genera UV, in gran parte assorbiti dall'alta atmosfera. Solo una piccola parte di essi (responsabili delle abbronzature) giunge sulla superficie della Terra. Gli UV distruggono i microrganismi e sono utilizzati nei processi di sterilizzazione.
$10^{-8} \div 10^{-12}$	$10^{16} \div 10^{20}$	$10^2 \div 10^6$	Raggi X	Prodotti dagli elettroni più interni degli atomi. Utilizzati in medicina per le radiografie. Producono effetti profondi negli atomi e molecole da loro attraversati e quindi gravi danni alle cellule dei tessuti. Una lunga esposizione a dosaggi elevati può provocare anche la morte.
$10^{-10} \div 10^{-15}$	$10^{18} \div 10^{23}$	$10^4 \div 10^{13}$	Raggi γ	Estremamente energetiche, di origine nucleare. Producono gravissimi danni agli organismi; pertanto la manipolazione di sostanze radioattive richiede particolari precauzioni. Presenti nella radiazione cosmica.

Un'informazione fornita dalla luce è quella relativa alla temperatura. Nel 1860, il fisico tedesco Gustav KIRCHHOFF comprese che ogni corpo materiale (come una stella), quando viene scaldato, emette onde elettromagnetiche, anche nel campo del visibile. Un esempio è un pezzo di ferro scaldato fino all'incandescenza, cioè fino ad emettere luce rossa. Tale fenomeno è indicato come *radiazione del corpo nero* (anche se gli oggetti incandescenti non sono neri). Lo spettro della radiazione del corpo nero presenta una forma caratteristica che varia a seconda della temperatura del corpo. La luce emessa da un oggetto incandescente è quindi paragonabile a una lettura termometrica. Pertanto lo spettro che osserviamo da stelle differenti ci comunica lo stato termico di quella determinata stella. Inoltre certi colori molto specifici non sono presenti negli spettri stellari; questi colori mancanti possono variare da stella a stella. Sapendo che ogni elemento chimico assorbe una serie caratteristica di colori ben specifici, confrontando questi ultimi con quelli che mancano dallo spettro di una stella si può determinare quali elementi sono presenti nella sua atmosfera.

Nell'osservare gli spettri di stelle appartenenti ad altre galassie, gli astronomi verificarono che essi presentavano gli stessi schemi caratteristici di colori osservabili anche per le stelle della nostra galassia, ma erano tutti spostati di una medesima quantità relativa verso il rosso dello spettro. I fisici indicano tale spostamento del colore come **effetto Doppler**. Esso è assai noto nel campo dei suoni. Quando un'automobile si avvicina, il suo motore produce un suono più alto, mentre quando si allontana il suono diventa più basso. Il suono è un'onda, cioè una successione di creste e di ventri. Quando un'automobile corre verso di noi mentre emette il suono, ogni cresta d'onda successiva si troverà via via più vicina alla nostra posizione, così che la distanza tra le creste d'onda (lunghezza d'onda) è minore di quanto si avrebbe nel caso l'auto fosse ferma. Quanto più la lunghezza d'onda è ridotta, tanto più è alto il numero di queste fluttuazioni che raggiungono l'orecchio ogni secondo e tanto più elevata è quindi la frequenza del suono stesso che risulta più "acuto". Se l'auto si sta allontanando, la lunghezza d'onda è maggiore e le onde raggiungono l'orecchio con una frequenza più bassa (suono più "basso"). Quanto più è alta la velocità con cui l'auto si muove, tanto più evidente è l'effetto Doppler, di cui è quindi possibile servirsi per misurare le velocità. Anche le onde luminose e le onde radio (elettromagnetiche) si comportano in modo simile (**fig. 1.35**).

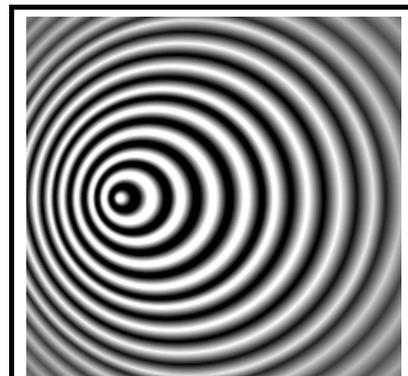


Fig. 1.35 - Una sorgente di onde in movimento verso sinistra. La frequenza è maggiore a sinistra e minore a destra.

Come rappresentato in **tab. 1.8**, le lunghezze d'onda della luce visibile stanno in un campo molto ridotto: $4.000 \div 7.000 \text{ \AA}$ (da 40 a 70 milionesimi di centimetro). L'occhio umano percepisce le diverse lunghezze d'onda della luce come colori differenti. Le lunghezze d'onda maggiori si collocano verso il rosso dello spettro, mentre quelle minori verso il blu. Immaginiamo ora una sorgente di luce ad una distanza fissa, come una stella, che emette onde luminose di una lunghezza d'onda costante. La lunghezza d'onda delle onde che riceviamo è la stessa alla quale vengono emesse. Se questa fonte si allontana, come nel caso del suono, la lunghezza d'onda della luce si allunga e quindi il suo spettro si sposterà verso l'estremo rosso dello spettro luminoso (**fig. 1.36**).

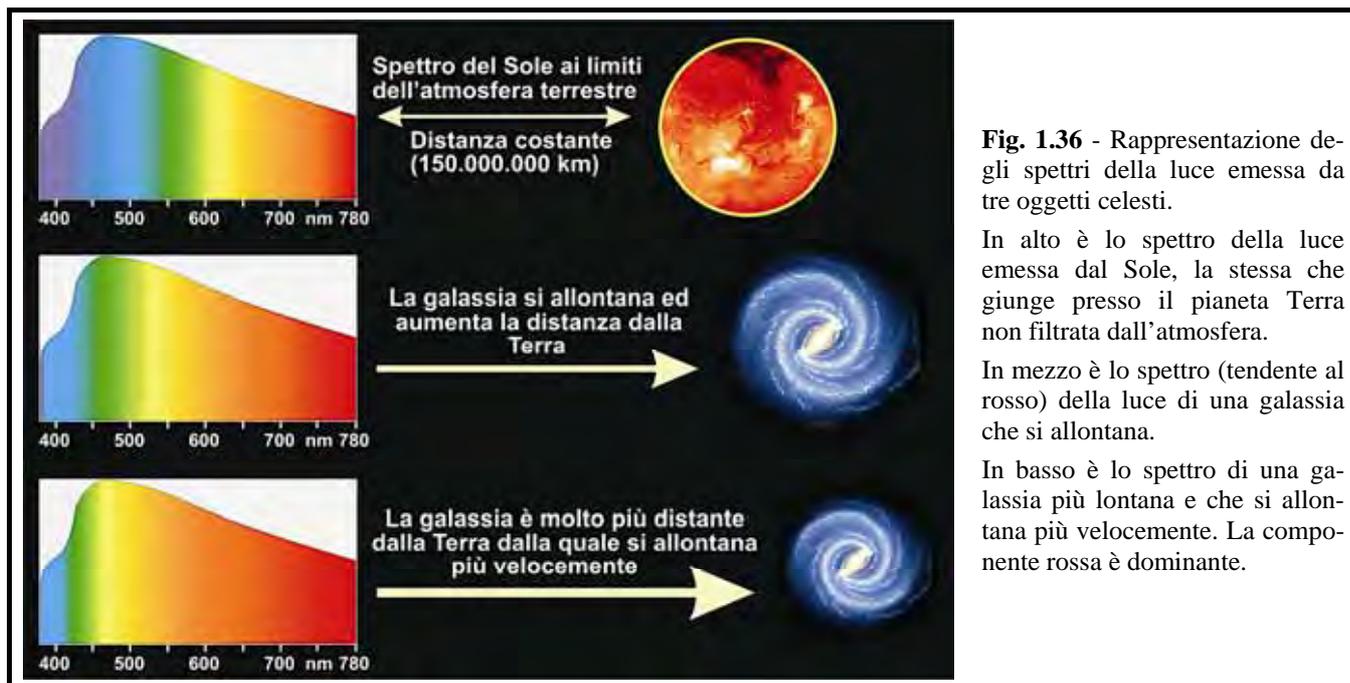


Fig. 1.36 - Rappresentazione degli spettri della luce emessa da tre oggetti celesti.

In alto è lo spettro della luce emessa dal Sole, la stessa che giunge presso il pianeta Terra non filtrata dall'atmosfera.

In mezzo è lo spettro (tendente al rosso) della luce di una galassia che si allontana.

In basso è lo spettro di una galassia più lontana e che si allontana più velocemente. La componente rossa è dominante.

Negli anni successivi alla dimostrazione dell'esistenza di altre galassie, Hubble si impegnò a catalogare le loro distanze e a osservare i loro spettri e scoprì che la luce della maggior parte delle galassie appare spostata verso il rosso: quasi tutte si stanno allontanando! Inoltre l'entità dello spostamento verso il rosso (*red shift*) di una galassia non è casuale, ma direttamente proporzionale alla distanza che ci separa da questa galassia. In altri termini, quanto più una galassia è distante, tanto più si allontana velocemente (**fig. 1.36**). Quindi l'Universo non è statico (o immutabile nelle sue dimensioni), ma si sta espandendo; **la distanza tra le diverse galassie continua a crescere**.

Le galassie si stanno allontanando con velocità tanto più alte quanto più sono lontane (**legge di Hubble**). Il rapporto tra la velocità di allontanamento " v " [km/s] delle galassie e la loro distanza " d " [MegaParsec] dalla Terra è costante e viene indicato con " H_0 ", una grandezza nota come **costante di Hubble**:

$$H_0 = \frac{v}{d}$$

Attualmente si stima che il valore di tale costante sia $H_0 = 50 \div 80 \text{ Km/s/MegaParsec}$.

La scoperta dell'espansione dell'Universo fu una delle grandi rivoluzioni intellettuali del XX secolo. Un Universo statico è inconcepibile, data l'assenza di una forza repulsiva in grado di contro-bilanciare l'attrazione gravitazionale che tutte le stelle e le galassie esercitano le une sulle altre. La mutua attrazione gravitazionale di tutte le stelle e le galassie ne causerebbe la contrazione. Anche se l'Universo si espandesse a una velocità piuttosto ridotta, la forza di gravità riuscirebbe infine a fermare la sua espansione, provocando, anche in questo caso, la sua contrazione. Ma se l'Universo si espandesse a una velocità superiore a un certo valore critico, la gravità non sarebbe abbastanza forte e l'Universo continuerebbe a espandersi per sempre. Come quando, dalla superficie della Terra, viene lanciato un razzo verso l'alto; se la sua velocità è insufficiente, la forza di gravità riuscirà a fermarlo e quindi farlo ricadere; ma se la sua velocità supera un certo valore critico, la gravità non sarebbe sufficiente per farlo tornare indietro ed esso si allontanerebbe definitivamente dalla Terra.

Dunque se l'Universo si sta espandendo, si possono formulare tre diversi modi in cui esso si può comportare. In un primo modo l'espansione non è sufficiente ad impedire all'attrazione gravitazionale di fermare l'espansione stessa. Le galassie inizieranno quindi a muoversi l'una verso l'altra e l'Universo entrerà in una fase di contrazione. Nel secondo modo, la velocità di espansione dell'Universo è talmente elevata che l'attrazione gravitazionale non riuscirà mai a fermarla, anche se la rallenterà un po'. C'è infine un terzo modo, in cui l'Universo si espande esattamente alla velocità richiesta per evitare di collassare su se stesso. La velocità alla quale le galassie si allontanano diventa via via più piccola, senza però mai azzerarsi. Quale dei modelli descrive effettivamente il nostro Universo? Esso cesserà infine di espandersi e inizierà a contrarsi, oppure continuerà a espandersi indefinitamente (fig. 1.37)?

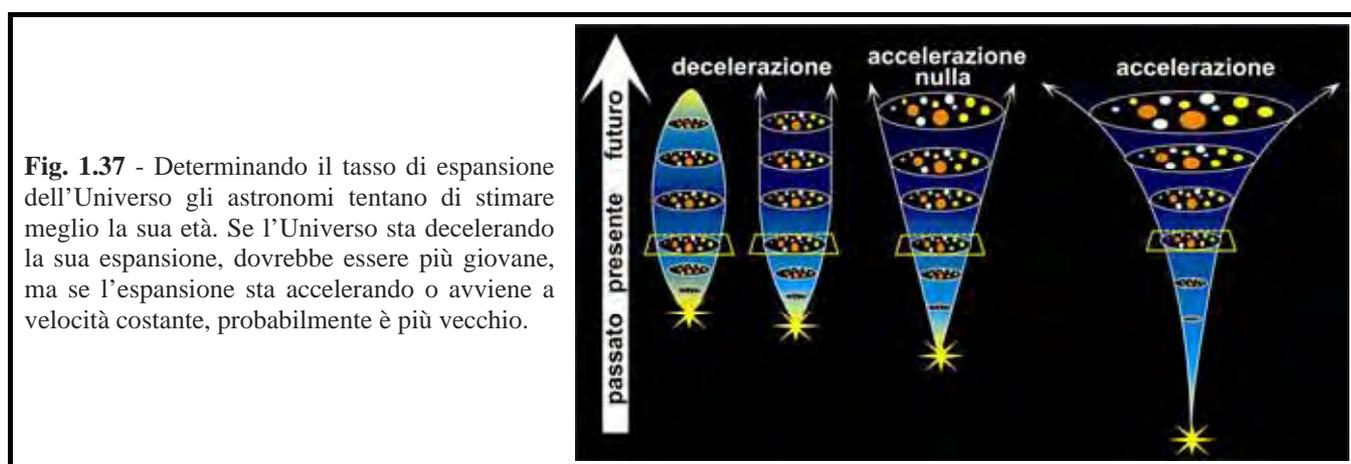


Fig. 1.37 - Determinando il tasso di espansione dell'Universo gli astronomi tentano di stimare meglio la sua età. Se l'Universo sta decelerando la sua espansione, dovrebbe essere più giovane, ma se l'espansione sta accelerando o avviene a velocità costante, probabilmente è più vecchio.

Con il rapido sviluppo di nuove tecnologie e con la recente costruzione di grandi telescopi installati sui satelliti, stiamo apprendendo nuove e sorprendenti novità intorno all'Universo. Ora abbiamo una discreta idea di che cosa accadrà in futuro. Probabilmente l'Universo continuerà a espandersi a una velocità via via crescente. Il tempo non avrà mai fine, almeno per quelli che sapranno essere abbastanza prudenti da non cadere in un buco nero. Ma per quanto riguarda i primissimi stadi della sua esistenza? Come ha avuto origine l'Universo e che cosa ne ha promosso l'espansione?

SCHEDA 1.10 - Processi di fusione e di fissione nucleari

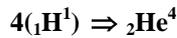
La **fusione nucleare** è il processo attraverso il quale si producono nuclei di elementi più pesanti a partire dalla fusione di nuclei di elementi più leggeri. Ci interessa la fusione di idrogeno in elio.

L'idrogeno è il primo elemento della tavola periodica; possiede un solo protone nel nucleo e un solo elettrone orbitale. La massa di un atomo di idrogeno è data essenzialmente da quella dell'unico protone ($1,6726 \cdot 10^{-24}$ g), essendo trascurabile quella dell'elettrone, circa 1.800 volte inferiore. Quest'ultimo è importante nel determinare le dimensioni dell'atomo, il cui diametro non supera $0,8 \cdot 10^8$ cm ed è molto più grande delle dimensioni del nucleo. L'interno del guscio elettronico è prevalentemente "vuoto" essendo minimo il volume del nucleo, pur essendo concentrata in esso la quasi totalità della massa dell'atomo. L'idrogeno è l'atomo più leggero e di costituzione più semplice rispetto a tutti gli elementi conosciuti, ma è il più abbondante nell'universo (quasi l'87 % della sua massa totale; **tab. 1.4**). Sulla Terra la quantità di idrogeno è decisamente inferiore; l'attrazione gravitazionale terrestre è insufficiente a trattenere elementi molto leggeri. Esso rappresenta il 15 % rispetto al numero totale di atomi della crosta (atmosfera, idrosfera, biosfera e litosfera fino alla profondità di 15 km) e meno dello 0,9 % della massa totale. L'idrogeno naturale è formato da tre isotopi: **protio** (${}^1\text{H}^1$), **deuterio** (${}^1\text{H}^2$) e **tritio** (${}^1\text{H}^3$). Il nucleo del primo, il più abbondante, è costituito da un protone (pertanto il numero di massa è 1, coincidente con il numero atomico). Il deuterio è 5.000 volte meno diffuso del protio e ha un nucleo con un protone e un neutrone (numero di massa 2). Infine il tritio (10^{17} volte più raro del deuterio) ha un nucleo con un protone e due neutroni (numero di massa 3).

Nei processi di fusione nucleare (reazioni termonucleari) la massa del nuovo nucleo formato non è pari alla somma di quella dei nuclei atomici che hanno partecipato alla fusione, ma leggermente inferiore. È per tale difetto di massa che, in base alla legge di Einstein ($E = \Delta m \cdot c^2$), si sviluppa energia a processo avvenuto. Nella formula " Δm " è il difetto di massa e " c " è la velocità della luce nel vuoto ($299.800 \text{ km/s} \cong 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$).

Affinché le reazioni termonucleari possano avvenire, è necessario che venga vinta la forza di repulsione elettrostatica tra cariche dello stesso segno, quali sono i protoni dei nuclei atomici che devono avvicinarsi a sufficienza affinché possano unirsi per formare nuclei più grandi. Ciò può avvenire per l'idrogeno alla temperatura di oltre 10.000.000 di gradi, la temperatura centrale del Sole. **Nell'interno del Sole avviene la fusione di quattro nuclei di Idrogeno (protoni) in un nucleo di Elio**, secondo lo schema della **fig. 1.38** (reazione protone-protone).

Quanta energia si libera per fusione di 100 litri di idrogeno (in condizioni standard) in elio? Nella fusione quattro nuclei di idrogeno protio (${}_1\text{H}^1$) formano un nucleo di elio (${}_2\text{He}^4$):



Il nucleo di Elio è costituito dall'insieme delle quattro masse del nuclide protio ($1,67262 \cdot 10^{-27}$ kg); quindi: $4 \cdot (1,67262 \cdot 10^{-27}$ kg) = $6,69048 \cdot 10^{-27}$ kg. La massa sperimentale del nucleo di elio vale $6,64647 \cdot 10^{-27}$ kg. Pertanto la massa del reagente è superiore a quella del prodotto. La differenza tra le due $\Delta m = (6,69048 \cdot 10^{-27}$ kg) - $(6,64647 \cdot 10^{-27}$ kg) = $0,04401 \cdot 10^{-27}$ kg rappresenta la quantità di materia che, a partire da 4 nuclei di idrogeno, si annichisce diventando energia (E) secondo la formula di Einstein:

$$E = \Delta m \cdot c^2 = (0,04401 \cdot 10^{-27} \text{ kg}) \cdot (2,998 \cdot 10^8 \text{ m/s})^2 \cong 3,956 \cdot 10^{-12} \text{ J (24,7 MeV)}$$

Il valore di quasi $4 \cdot 10^{-12}$ J è sicuramente molto piccolo. Per tale ragione conviene utilizzare un'altra unità di misura di energia, molto usata nel settore della fisica nucleare: l'**elettronvolt (eV)**. Per capire il significato di tale unità è necessario conoscere alcuni temi della fisica dei fenomeni elettrici. Pertanto ci si limita ad utilizzare il termine "*elettronvolt*" senza pretendere, per ora, di comprendere la sua origine. Osserviamo che si tratta di una unità di misura piccolissima, per cui si usa frequentemente il multiplo "**MeV**" (megaelettronvolt = 10^6 eV). In sintesi valgono le seguenti equivalenze:

$$1 \text{ J} = 0,239 \text{ cal} = 6,25 \cdot 10^{18} \text{ eV} = 6,25 \cdot 10^{12} \text{ MeV}$$

Dove la caloria [cal] è la quantità di calore utile ad innalzare la temperatura di un grado di un grammo (1 cm^3) di acqua. In ogni caso, qualunque unità si scelga, la formazione di un nucleo di elio per fusione nucleare è molto piccola. Ma anche l'atomo di elio è molto piccolo. Per tornare al quesito di partenza, quanti atomi di elio si formano a partire da 100 litri di idrogeno? In condizioni standard (pressione P = 1 atm e temperatura T = $0^\circ\text{C} = 273^\circ\text{K}$) una mole di idrogeno (circa 1 g) occupa il volume molare ($V_0 = 22,4 \text{ L}$). La presenza di nuclidi di deuterio (${}_1\text{H}^2$) e di trizio (${}_1\text{H}^3$) è irrilevante. Pertanto a 100 L di idrogeno in condizioni standard corrispondono $(100 \text{ L}) : (22,4 \text{ L/mole}) = 4,46$ moli. Ogni mole contiene il numero di Avogadro $N = 6,022 \cdot 10^{23}$ molecole di idrogeno (H_2). Quindi il numero totale di atomi coinvolti è $N_t = (4,46 \text{ moli}) \cdot (6,022 \cdot 10^{23} \text{ molecole/mole}) \cdot (2 \text{ atomi/molecola}) = 5,372 \cdot 10^{24}$. Dato che quattro nuclei di idrogeno formano un nucleo di elio con liberazione di E_4 , l'energia totale (E_t) liberata dalla fusione di 100 L di idrogeno vale:

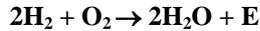
$$E_t = 1/4 \cdot N_t \cdot E_4 = 1/4 \cdot (5,372 \cdot 10^{24}) \cdot (3,956 \cdot 10^{-12} \text{ J}) = 5,313 \cdot 10^{12} \text{ J (5.313.000.000.000 J)}$$

Fig. 1.38 - Descrizione del processo nucleare di fusione dell'idrogeno in elio attraverso le fasi protone - protone.

Fase A	<p>protone + protone = Deuterio (${}_1\text{H}^2$) + positrone + ν neutrino</p>	<p>In condizioni di alta densità (tante particelle in poco spazio) e di temperatura molto elevata (oltre 10^7 gradi), due nuclei di idrogeno (due protoni) danno origine ad un nucleo di deuterio. Uno dei due protoni si trasforma in un neutrone con liberazione di un positrone. Tale processo comporta anche la liberazione di un neutrino e di energoasotto forma di calore.</p>
Fase B	<p>Deuterio (${}_1\text{H}^2$) + protone = Elio (${}_2\text{He}^3$) + γ Raggi gamma</p>	<p>Un atomo di deuterio si fonde con un protone per produrre un isotopo dell'elio con liberazione di raggi γ ed ulteriore energia termica.</p>
Fase C	<p>Elio (${}_2\text{He}^3$) + Elio (${}_2\text{He}^3$) = Elio (${}_2\text{He}^4$) + protone + protone + γ Raggi gamma</p>	<p>A loro volta due nuclei di ${}_2\text{He}^3$ fondono in un nucleo di ${}_2\text{He}^4$ (2 protoni + 2 neutroni), lasciando liberi i restanti 2 protoni, che possono ricominciare il ciclo. Ogni volta che il ciclo viene compiuto, 4 protoni vengono convertiti nel nucleo di elio, attraverso la catena descritta.</p>
<p>Il positrone è l'antiparticella dell'elettrone (e^-) ossia un elettrone positivo anziché negativo, con simbolo fisico "e^+".</p>		
<p>Il neutrino è una particella di cui si conosce poco; si sa che è neutro e $10^5 \div 10^6$ volte più piccolo dell'elettrone, si muove a velocità prossima a quella della luce, il suo simbolo fisico è "ν". Tali caratteristiche lo rendono capace di attraversare la materia, per cui è difficile intercettarlo e studiarlo.</p>		
<p>Il raggio gamma è una radiazione di tipo elettromagnetico ad alta frequenza e molto energetica, con simbolo fisico "γ".</p>		

Con quasi 9 g di idrogeno (che dallo stato di gas occupante 100 L possono essere compressi in pochi cm³ allo stato liquido) è possibile ottenere una quantità di energia sufficiente per portare ad ebollizione oltre 13 m³ d'acqua (quanta potrebbe essere contenuta in una piccola stanza) inizialmente alla temperatura di 0 °C. Si tratta di una quantità di energia pulita equivalente a quella inquinante producibile con 90 kg di carbone. Su questa base un solo decimo della massa di Idrogeno contenuta nel Sole è in grado di formare elio e sviluppare un'energia di $9.2 \cdot 10^{43}$ joule; essa, consumata al tasso di $3.86 \cdot 10^{26}$ J/s (che rappresenta la luminosità solare), risulta sufficiente per circa 7,5 miliardi di anni, ben oltre l'età della Terra.

Non bisogna confondere il processo nucleare di fusione (appena descritto) con quello chimico di combustione dell'idrogeno. L'idrogeno (H₂) reagisce a contatto con l'ossigeno (O₂) nel seguente modo:



Dunque si tratta di un processo esoergonico: si ottiene acqua (H₂O) e molta energia (E). È allora possibile costruire automobili che utilizzino, come carburante, idrogeno anziché benzina o gasolio. Nel motore, bruciando H₂, si ottiene l'energia che viene convertita in movimento. Il prodotto di scarto è solamente acqua. Sembra così di aver risolto il grave problema dell'inquinamento dell'aria da parte della maggior parte dei mezzi di trasporto che, utilizzando carburanti derivanti dal petrolio, liberano nell'aria prodotti di scarto nocivi, oltre a grandi quantità di anidride carbonica (CO₂), il principale gas responsabile dell'effetto serra. Perché allora si producono pochi mezzi ad idrogeno? Perché tanta resistenza nell'utilizzo di un carburante assolutamente pulito? Queste domande richiedono le seguenti considerazioni:

- non esistono serbatoi di idrogeno libero (quali fonti energetiche) sul nostro pianeta (ad eccezione di modestissime quantità ai limiti superiori dell'atmosfera);
- un modo per produrre idrogeno è l'elettrolisi dell'acqua, che consiste nello "smontare" le molecole di H₂O separando da esse l'H₂; tale processo (o anche altri) comporta elevate quantità di energia elettrica;
- l'energia elettrica viene prodotta per mezzo dei combustibili fossili (petrolio, carbone,...), delle centrali nucleari e in misura molto limitata, con altri sistemi che utilizzano fonti rinnovabili;
- se si utilizzasse energia elettrica prodotta con la combustione dell'idrogeno al fine di produrre l'idrogeno stesso mediante l'elettrolisi (o con qualunque altro sistema), si scoprirebbe ciò che per i fisici è scontato e cioè che ogni trasformazione da una forma di energia ad un'altra comporta sempre ed inevitabilmente una perdita; in un qualunque sistema, più numerose sono le trasformazioni energetiche, minore è il rendimento complessivo del sistema stesso;
- quindi il consumo di fonti energetiche tradizionali per produrre H₂ da utilizzare per i mezzi di trasporto ad idrogeno risulta, su scala globale, superiore al consumo dei combustibili fossili dai quali si ottengono direttamente i carburanti di vario tipo.

Quindi è realmente possibile e/o conveniente incentivare i mezzi di trasporto con motori ad idrogeno? Piuttosto l'idrogeno potrebbe essere utilizzato in processi termonucleari di fusione che, come sopra descritto, potrebbero fornire molta energia pulita. Se facessimo come il Sole? Il problema è proprio questo. L'uomo è già riuscito a fondere l'idrogeno, ma soltanto con le bombe atomiche. È possibile fondere l'idrogeno in modo controllato e non soltanto tramite una tremenda esplosione? Questa è la scommessa del futuro scientifico. Si tratta di una speranza! Basterebbe consumare poca energia per produrre idrogeno ed ottenere, per fusione in elio, enormi quantità di energia pulita, risolvendo quindi uno dei problemi fondamentali dell'umanità. È solo una speranza? Molto dipende da quanto siamo disposti ad investire nella ricerca di base di più alto livello nel settore della fisica. Attualmente i fisici affermano che forse entro l'anno 2050 si riuscirà nell'impresa.

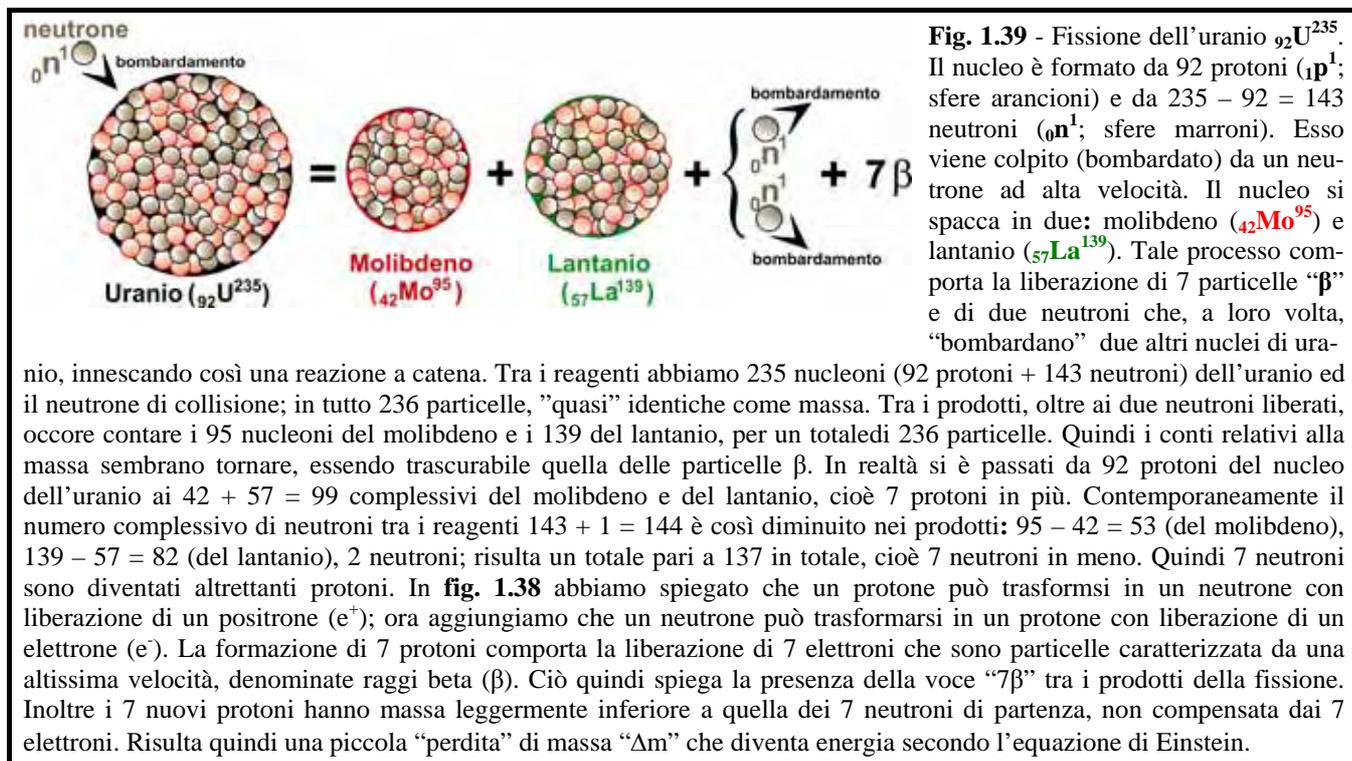
Il processo nucleare di fusione comporta la produzione di nuclei atomici più grandi a partire da nuclei con numero atomico più piccolo. Esiste un altro processo nucleare (**fissione**) che comporta un risultato opposto: nuclei grandi che vengono "spaccati" in nuclei più piccoli ed anche in questo caso si ottengono grandi quantità di energia sfruttando piccole masse di materiali radioattivi. Il nuclide ${}_{92}\text{U}^{235}$ è un isotopo dell'uranio. Esso decade emettendo radiazioni α (nuclei di elio ${}_{2}\text{He}^4$) per trasformarsi in nuclei di torio (${}_{90}\text{Th}^{231}$) nel seguente modo:



Risulta una perdita di massa (Δm) dal reagente ai prodotti e quindi una corrispondente energia (E) secondo la succitata equazione di Einstein ($\Delta m \cdot c^2$). Nelle rocce presenti nella crosta terrestre e nel sottostante mantello (e probabilmente anche nelle maggiori profondità) è presente uranio, seppure in quantità molto piccole. È una miscela di ${}_{92}\text{U}^{235}$ (molto raro) e di ${}_{92}\text{U}^{238}$ (decisamente più abbondante del precedente). Il nuclide ${}_{92}\text{U}^{235}$ decade (con tempo di dimezzamento $T_{1/2} = 7,13 \cdot 10^8$ anni) nel modo precedentemente descritto. Decade anche il nuclide ${}_{92}\text{U}^{238}$, ma in modo molto più blando, tanto che può essere ritenuto molto poco radioattivo.

Nelle zone ove l'uranio è più abbondante è conveniente l'attività di cava dei materiali contenenti tale elemento. Mediante processi industriali viene quindi estratto l'uranio, ma si tratta della miscela ${}_{92}\text{U}^{238} + {}_{92}\text{U}^{235}$, nella quale prevale nettamente il nuclide più pesante, talmente poco radioattivo da essere inutile ai fini della produzione di energia nucleare. Pertanto si procede ad un ulteriore processo industriale molto raffinato e tecnologicamente evoluto, per "estrarre" una miscela caratterizzata da un elevato tenore di ${}_{92}\text{U}^{235}$ (uranio arricchito). Ciò che rimane è uranio impoverito, quasi esclusivamente costituito da ${}_{92}\text{U}^{238}$, inutile ai fini energetici, poco o nulla radioattivo. Le radiazioni emesse dall'uranio impoverito sono trascurabili, grosso modo dello stesso ordine di grandezza di quelle di fondo normalmente presenti in quasi tutti gli ambienti terrestri. Si tratta quindi di materiale poco pericoloso, caratterizzato da elevato peso specifico e adatto per determinate applicazioni, purtroppo anche per la costruzione di proiettili che, essendo più pesanti di quelli realizzati con il comune piombo, si prestano meglio ai fini balistici.

Il naturale decadimento dell'uranio (da 1 kg si ottiene quasi 10^{11} J) nei materiali profondi della Terra fornisce l'energia necessaria per lo sviluppo dei movimenti nel mantello, all'origine della deriva dei continenti. Il nuclide ${}_{92}\text{U}^{235}$ può essere utilizzato per produrre energia nucleare per mezzo del bombardamento di neutroni (**fig. 1.39**).



Tra i reagenti abbiamo 235 nucleoni (92 protoni + 143 neutroni) dell'uranio ed il neutrone di collisione; in tutto 236 particelle, "quasi" identiche come massa. Tra i prodotti, oltre ai due neutroni liberati, occorre contare i 95 nucleoni del molibdeno e i 139 del lantanio, per un totale di 236 particelle. Quindi i conti relativi alla massa sembrano tornare, essendo trascurabile quella delle particelle β. In realtà si è passati da 92 protoni del nucleo dell'uranio ai $42 + 57 = 99$ complessivi del molibdeno e del lantanio, cioè 7 protoni in più. Contemporaneamente il numero complessivo di neutroni tra i reagenti $143 + 1 = 144$ è così diminuito nei prodotti: $95 - 42 = 53$ (del molibdeno), $139 - 57 = 82$ (del lantanio), 2 neutroni; risulta un totale pari a 137 in totale, cioè 7 neutroni in meno. Quindi 7 neutroni sono diventati altrettanti protoni. In **fig. 1.38** abbiamo spiegato che un protone può trasformarsi in un neutrone con liberazione di un positrone (e^+); ora aggiungiamo che un neutrone può trasformarsi in un protone con liberazione di un elettrone (e^-). La formazione di 7 protoni comporta la liberazione di 7 elettroni che sono particelle caratterizzate da una altissima velocità, denominate raggi beta (β). Ciò quindi spiega la presenza della voce "7β" tra i prodotti della fissione. Inoltre i 7 nuovi protoni hanno massa leggermente inferiore a quella dei 7 neutroni di partenza, non compensata dai 7 elettroni. Risulta quindi una piccola "perdita" di massa "Δm" che diventa energia secondo l'equazione di Einstein.

Si tratta dello stesso meccanismo applicato alle prime bombe atomiche ed alle attuali centrali energetiche nucleari. Perché tali centrali sono molto chiacchierate?

- l'energia di origine nucleare evoca il ricordo dei disastri provocati dalle prime bombe atomiche usate in Giappone al termine della Seconda Guerra Mondiale;
- gli effetti devastanti delle radiazioni emesse nei processi di fissione sugli organismi sono ben noti all'opinione pubblica;
- il rischio di incidenti a carico delle centrali nucleari è fortemente temuto, soprattutto da parte delle popolazioni che vivono nei territori circostanti;
- la produzione energetica nucleare comporta scorie radioattive molto pericolose che, in qualche modo, devono essere smaltite senza danni alle persone ed all'ambiente.

Sappiamo che i moderni sistemi di produzione di energia di origine nucleare sono molto più sicuri rispetto alle prime centrali ed i rischi sono estremamente ridotti, tanto che questo aspetto sempre meno viene considerato dagli oppositori. La discussione intorno a questo tema inoltre non dovrebbe essere condizionata dai sentimenti irrazionali della paura ingiustificata (alimentata dall'ignoranza).

Il problema vero è rappresentato dallo smaltimento delle scorie radioattive che, tra l'altro, non sono soltanto quelle delle centrali nucleari. Molte applicazioni industriali infatti ed anche attività ospedaliere, comportano lo scarto di residui radioattivi, seppure costituenti una frazione relativamente piccola. L'individuazione di siti per la realizzazione di discariche per rifiuti radioattivi è una questione di difficile risoluzione. Qualunque area, una volta individuata, vede la forte opposizione delle popolazioni locali e richiede studi preparatori molto impegnativi, lunghi e costosi. Lo smaltimento costituisce dunque la ragione principale dell'opposizione ai sistemi di produzione nucleare, ma i sostenitori propongono argomenti che sembrano altrettanto convincenti:

- se il problema dello smaltimento delle scorie radioattive è grave, ancor più grave è l'inquinamento dell'aria dovuto alla produzione di energia mediante i combustibili fossili (petrolio, carbone,...); anche l'utilizzo di metano, comportando produzione di CO_2 , contribuisce all'incremento dell'effetto serra e quindi all'alterazione del clima a livello globale;
- i consumi energetici, nel Mondo, stanno vertiginosamente aumentando, anche e soprattutto grazie allo sviluppo economico - produttivo in grandi Paesi molto popolosi come la Cina e l'India; continuare nell'uso dei combustibili fossili e/o coltivare troppe speranze nei confronti delle fonti alternative per ottenere risultati significativi a breve periodo, significa condannare la Terra ad essere avvolta da una atmosfera profondamente ed irreversibilmente alterata;
- le produzioni alternative, nonostante l'attuale livello tecnologico, non sono sufficienti a coprire porzioni significative dei fabbisogni energetici e comunque anch'essi comportano, salvi rari casi, danni all'ambiente;
- le produzioni idroelettriche, che sfruttano l'abbondanza d'acqua delle nostre montagne, rappresentano una porzione relativamente modesta del fabbisogno energetico nazionale; le risorse idriche sono ormai ampiamente sfruttate e vi sono scarsi margini di incremento; inoltre la sottrazione di acqua dai fiumi per produrre energia determina gravi conseguenze sugli ecosistemi fluviali;
- l'Italia, che ha rifiutato, con un referendum, la produzione nucleare, importa tale tipo di energia dai Paesi vicini (soprattutto Francia); vogliamo consumare tanta energia, ma non vogliamo produrla nel nostro territorio.

Bisogna tuttavia tenere conto che anche i materiali radioattivi rappresentano una risorsa energetica "finita", cioè di limitata disponibilità; se si incrementasse la produzione di energia nucleare presto verrebbero esaurite anche le fonti di uranio e degli

altri materiali fissibili. Come si vede il problema è molto complesso e tutti hanno ragione, ma tutti hanno torto. Certamente l'intera questione energetica sarebbe più semplice se consumassimo meno energia. In linea molto generale gli opinionisti, intorno a tale problema, si potrebbero raggruppare (esagerando un po') nel modo seguente:

- **inguaribili ottimisti** (coloro che nutrono grande fiducia nel progresso scientifico e tecnologico; i mezzi di trasporto diventeranno sempre più efficienti, si scopriranno nuovi sistemi di produzioni energetiche meno inquinanti, riusciremo a riciclare tutto o quasi, ridurremo le fonti inquinanti,... la scienza salverà l'umanità);
- **pessimisti integralisti** (coloro che mettono in guardia l'umanità rispetto al grave problema della sovrappopolazione; quasi tre miliardi di persone, soprattutto in Cina ed in India, saranno presto in grado di consumare molta più energia e porzioni sempre più ampie di territorio; i presupposti vantaggi derivanti dal progresso tecnologico non potranno reggere il passo dell'incremento del consumo delle risorse naturali; la Terra è quindi destinata al collasso; l'unica soluzione è la drastica diminuzione dei consumi, cominciando almeno da quelli più inutili e nelle Nazioni più ricche);
- **economisti pragmatici** (tutte le soluzioni tendenti al riequilibrio ambientale del Globo ed alla redistribuzione più equa delle risorse naturali ed energetiche potrebbero compromettere gli attuali equilibri economici mondiali; inoltre i popoli delle nazioni più ricche sono poco o nulla disponibili alla rinuncia dei loro privilegi; i problemi dell'ambiente, per quanto gravi, sono meno "pericolosi" di quelli che verrebbero innescati da una qualunque rivoluzione economica).

È obbligatorio, per un qualunque cittadino schierarsi in una delle succitate categorie? Sono possibili posizioni intermedie? Forse la questione energetica risulterebbe più semplice se vi fosse una maggiore cultura scientifica diffusa, se si investisse di più nella ricerca e se almeno si evitassero gli sprechi più inutili?

SCHEDA 1.11 - Evoluzione dell'Universo

In un momento del passato (13 ÷ 14 miliardi di anni fa), la distanza fra le galassie doveva essere pari a zero; l'intero Universo era compresso in un singolo punto di dimensioni nulle (**singolarità**). È l'istante che indichiamo con il termine **Big Bang**, quando l'Universo doveva essere infinitamente "caldo". In seguito, con l'espansione, la temperatura della radiazione è andata diminuendo. A quelle temperature così alte, le particelle dovevano muoversi così velocemente da sfuggire ad ogni attrazione reciproca di forze nucleari o elettromagnetiche. Con il raffreddamento le particelle poterono attrarsi a vicenda, unendosi tra loro.

Gli atomi sono costituiti da particelle più piccole: elettroni, protoni e neutroni. Protoni e neutroni, a loro volta, sono composti da particelle ancora più piccole: **quark**. Per ognuna di queste particelle esiste una corrispettiva antiparticella. Le antiparticelle hanno stessa massa delle loro rispettive particelle, ma si oppongono a esse per quanto riguarda la carica e altri attributi. Per esempio l'antiparticella di un elettrone (positrone) ha una carica positiva (e^+), l'opposto della carica dell'elettrone (e^-). Quando una particella e la sua antiparticella si incontrano, si annichiscono a vicenda con produzione di energia di quantità corrispondente a quella della somma delle masse (Δm) delle due particelle secondo l'equazione di Einstein ($E = \Delta m \cdot c^2$).

L'energia luminosa viaggia sotto forma di un altro tipo di particella priva di massa: **fotone**.² Il Sole è per la Terra la più grande fonte di fotoni, oltre ad essere un'immensa sorgente di un altro tipo di particelle che abbiamo già menzionato in **fig. 1.38**: neutrini e antineutrini che, avendo massa pari quasi a zero, interagiscono poco o nulla con la materia e passano attraverso i nostri corpi, senza effetti, al ritmo di miliardi al secondo. I fisici hanno scoperto numerose particelle elementari. Con l'evoluzione dell'Universo anche la composizione di questo insieme di particelle si è a sua volta evoluta e ciò ha permesso l'esistenza di pianeti come la Terra.

Un secondo dopo il Big Bang, l'Universo si era espanso abbastanza da far scendere la propria temperatura a poco più di dieci miliardi di gradi (mille volte maggiore di quella al centro del Sole); in tali condizioni erano presenti fotoni, elettroni e neutrini (e corrispettive antiparticelle), insieme a pochissimi protoni e neutroni. Queste particelle avevano talmente tanta energia che, quando si scontravano, producevano molte coppie differenti di particelle/antiparticelle. Per esempio, la collisione tra due fotoni poteva produrre un elettrone ed un positrone, che a loro volta potevano scontrarsi tra loro annichendosi. Mentre l'Universo continuava a espandersi e la sua temperatura a diminuire, le collisioni aventi energia sufficiente a creare le coppie elettrone/positrone divennero meno frequenti, fino ad essere inferiori alle collisioni di annichimento tra di loro. Per tale ragione tali particelle si "consumarono" per lasciar posto ad un crescente numero di fotoni, lasciando solo un numero relativamente piccolo di elettroni.

Circa cento secondi dopo il Big Bang la temperatura scese a un miliardo di gradi (quella interna delle "odierne" stelle più calde). In tali condizioni l'energia cinetica di protoni e neutroni non era più sufficiente per contrastare l'azione della cosiddetta "*forza forte*"; essa è una forza attrattiva a corto raggio e permette ai protoni e neutroni di legarsi per formare i

² L'idea della trasmissione di energia tramite fotoni è complementare a quella che prevedere tale trasmissione tramite onde elettromagnetiche. Sono due sistemi teorici che non sono in contraddizione, ma utilizzabili, di volta in volta ora l'uno ora l'altro, a seconda delle situazioni e a seconda della "convenienza" nell'interpretare i fenomeni naturali. In certi situazioni è più conveniente spiegare gli effetti della luce visibile come propagazione di onde elettromagnetiche di varie lunghezze d'onda come, per esempio, nel caso dello studio della tendenza al rosso dello spettro delle galassie che si allontanano. In altre situazioni potrebbe essere, per esempio, più efficace concepire il trasporto della luce solare tramite piccolissimi pacchetti di energia (fotoni) che, essendo privi di massa, possono normalmente viaggiare alla massima velocità di 300.000 km/s, come se costituissero uno "sciame" di proiettili che "bombardano" la superficie della Terra.

nuclei. Iniziarono a formarsi i nuclei di deuterio (${}_1\text{H}^2$) e di elio (${}_2\text{He}^4$) e anche piccole quantità di alcuni elementi un po' più pesanti, come litio e berillio. Circa 1/4 dei protoni e dei neutroni si sarebbero convertiti in nuclei di elio, insieme a piccole quantità di ${}_1\text{H}^2$ e di altri elementi. I neutroni rimanenti sarebbero decaduti in protoni, i nuclei degli atomi del comune idrogeno (${}_1\text{H}^1$).

Tab 1.9 - Cronologia schematica del Big Bang e della successiva evoluzione dell'Universo. La rappresentazione grafica degli eventi descritti è rappresentata in fig. 1.40 .	
0	<i>Tempo cosmico.</i> Quasi 14 miliardi di anni fa l'intero Universo era concentrato in un unico punto (<i>singolarità</i>), praticamente privo di dimensioni. Da quell'istante ha luogo la grande esplosione (Big Bang).
10^{-43} s	<i>Tempo di Planck.</i> Temperatura $\sim 10^{32}$ °K; dimensioni $\sim 10^{-33}$ cm. Da questo istante l'Universo si espande, soprattutto mediante radiazioni (energia). La materia diventerà protagonista solo in seguito.
10^{-36} s	Inizia l'espansione violenta dell'Universo (<i>epoca dell'inflazione</i>) Temperatura $\sim 10^{30}$ °K; dimensioni $\sim 10^{-26}$ cm. Si formano le prime particelle quali quark e leptoni e le rispettive antiparticelle.
10^{-4} s	La temperatura precipita a $\sim 10^{12}$ °K. I quark formano i barioni (protoni e neutroni), gli antiquark formano antiprotoni e antineutroni.
1 s	Temperatura $\sim 1,4 \cdot 10^{10}$ °K. I barioni sono abbondanti; di essi circa 3/4 sono protoni ed 1/4 sono neutroni. Compaiono i primi elettroni ed i rispettivi positroni.
200 s	Temperatura 10^9 °K. Continua la trasformazione da neutroni a protoni che ora raggiungono il 4/5 % dei barioni. Scompaiono i positroni. Inizia la nucleosintesi di deuterio, di elio e di altri elementi leggeri
10^4 anni	Temperatura ~ 140.000 °K. Continua l'era della radiazione, ma diventa importante anche (e sempre di più) la materia. L'energia è dominata dalla materia, cioè all'energia connessa con la massa ($E = m \cdot c^2$).
$3 \cdot 10^5$ anni	Temperatura ~ 4.000 °K. Continua l'era della materia. L'energia dei fotoni è così bassa che i fotoni non sono più in grado di distruggere gli atomi che si vanno formando. In un tempo relativamente breve gli elettroni si uniscono ai protoni formando atomi di idrogeno; i nuclei di elio con gli elettroni formano atomi di elio.
10^9 anni	Vi sono disomogeneità spaziali nella distribuzione della materia: si formano nubi di materia e per effetto gravitazionale le <i>protogalassie</i> , entro le quali si formano le <i>protostelle</i> . Col tempo le protostelle divengono più piccole; la temperatura all'interno aumenta finché iniziano le reazioni termonucleari, con produzione di elio dall'idrogeno. Nelle stelle massicce anche l'elio fonde per produrre carbonio, ossigeno e ferro.
10^{10} anni	Si formano la Via Lattea e si determinano le condizioni per la nascita del Sistema Solare. Il materiale raccolto dalla nostra galassia è in prevalenza idrogeno ed elio (quello prodotto all'inizio dell'Universo); sono presenti anche materiali come il ferro, sintetizzati in precedenza in una stella massiccia poi esplosa.
$14 \cdot 10^9$ anni	Circa un milione di anni fa, si sviluppa l' <i>homo sapiens</i> , che inizia a domandarsi come è fatto l'Universo. L'attuale temperatura dell'Univrsio è poco meno di 3 °K; cioè la radiazione cosmica di fondo (radiazione fossile, ciò che resta della radiazione iniziale fortissima dei primi istanti dopo il Big Bang).
La materia è composta da atomi, a loro volta formati da un nucleo composto di protoni (p) e neutroni (n) e da elettroni (e) che circondano il nucleo. Mentre gli elettroni non sono composti da altre particelle, i protoni e i neutroni sono costituiti da particelle elementari: i quark . Vi sono sei tipi di quark: up, down, charm, strange, top e bottom. Per ogni quark esiste la sua antiparticella: antiup, antidown, anticharm,... I protoni per esempio sono composti da due quark up e un quark down, mentre il neutrone è formato da due quark down e uno up. Le particelle composte da tre quark come il protone e il neutrone vengono dette barioni . Oltre alle particelle composte da tre quark o da tre antiquark vi sono anche particelle composte da un quark o da un antiquark: i mesoni. Barioni e mesoni sono anche detti adroni. Si ritiene che i quark non esistano da soli, ma solo in gruppi di due o tre o cinque.	
Si conoscono sei leptoni , dei quali tre hanno carica elettrica, mentre gli altri tre ne sono privi. Il leptone carico più conosciuto è l'elettrone (e). Gli altri due leptoni carichi sono il muone (μ) e il tau (τ), simili ad elettroni con più massa. I leptoni carichi sono tutti negativi. Gli altri tre leptoni sono gli elusivi neutrini (ν_e ; fig. 1.38).	
L' antimateria è la materia composta dalle antiparticelle corrispondenti alle particelle che costituiscono la materia ordinaria. Ad esempio, un atomo di antidrogeno, è composto da un antiprotone caricato negativamente, attorno al quale orbita un positrone (antielettrone) caricato positivamente. Se una particella viene a contatto con la sua antiparticella, le due si annichilano emettendo radiazione elettromagnetica, corrispondente ad una quantità di energia "E" che dipende dalle masse (Δm) interagenti secondo l'equazione di Einstein ($E = \Delta m \cdot c^2$).	

Questa ricostruzione di una prima fase caldissima dell'Universo venne proposta nel 1948 da George GAMOW. Egli ipotizzò che la radiazione (sotto forma di fotoni) emessa nei primi stadi caldissimi della vita dell'Universo avrebbe dovuto esistere ancora, ma con una temperatura ridotta a pochi gradi sopra dello zero assoluto ($-273^0 \text{ C} = 0 \text{ °K}$, la temperatura più bassa possibile, alla quale le sostanze non hanno energia termica). Ciò che Arno PENZIAS e Woodrow WILSON scoprirono nel 1965 fu proprio questa radiazione a microonde ancora attualmente presente (**radiazione cosmica di fondo** o **radiazione fossile**), cioè la prova sperimentale dell'intuizione di Gamow.

Alan GUTH, nel 1979, suggerì che l'Universo primitivo potrebbe aver attraversato un periodo di espansione estremamente rapida, a una velocità esponenziale, detta "inflazionaria". Un miliardesimo di trilionesimo di trilionesimo di secondo dopo il Big Bang, il raggio dell'Universo crebbe di un milione di migliaia di miliardi di miliardi di miliardi (10^{30}) di volte.

A poche ore dal Big Bang cessò la produzione di elio e di altri elementi. Da quel momento, per un milione di anni, l'Universo continuò a espandersi, senza grandi novità. Quando la temperatura scese a poche migliaia di gradi, elettroni e nuclei non avevano più l'energia cinetica necessaria per vincere l'attrazione elettromagnetica fra loro e iniziarono a combinarsi per formare gli atomi.

Nel suo complesso l'Universo continuò a espandersi e a raffreddarsi, ma nelle regioni dove la densità era leggermente superiore alla media, l'espansione risultava rallentata dalla maggiore attrazione gravitazionale. In alcune regioni, questa attrazione arrestò l'espansione avviando una ricontrazione (collasso), nel corso del quale l'attrazione gravitazionale di materia esterna a queste regioni avviò a un lento moto rotatorio, sempre più veloce, con la riduzione, per collasso, delle dimensioni di tali regioni. Una volta che le dimensioni si erano sufficientemente ridotte, la forza centrifuga derivante dall'accresciuta velocità di rotazione arrivò a bilanciare la forza centripeta gravitazionale, con conseguente formazione di galassie discoidali in rotazione su se stesse. Altre regioni, che non erano riuscite ad avviare un moto rotatorio, avrebbero invece assunto la forma di oggetti ovali (galassie ellittiche).

Con il tempo, i gas di idrogeno ed elio nelle galassie si frazionarono in nubi più piccole, che iniziarono a loro volta a collassare per gravità scaldandosi e con formazione di *protostelle*. Con la contrazione gli atomi in esse contenuti entravano in collisione gli uni con gli altri, la temperatura saliva fino a diventare sufficiente ad innescare reazioni di fusione nucleare di idrogeno in elio (**scheda 1.10**), con conseguente liberazione di energia sotto forma di luce, ciò che fa brillare le **stelle**.

L'energia liberata con i processi nucleari comporta un ulteriore aumento della temperatura e quindi della pressione fino a controbilanciare l'attrazione gravitazionale, arrestando la contrazione della stella in una condizione più o meno paragonabile a quella del Sole attuale. Una volta formata una stella rimane stabile per lungo tempo. Successivamente essa esaurisce il proprio idrogeno e gli altri combustibili nucleari. Quanto più è elevata la quantità di combustibile con cui una stella inizia la propria vita, tanto prima essa lo esaurisce. Quanto più una stella è grande, tanto più la sua temperatura deve essere elevata per compensare la maggiore attrazione gravitazionale. Ma quanto più una stella è calda, tanto più veloce è la fusione nucleare ed impiegherà meno tempo per esaurire il proprio combustibile. Una stella con massa 10 volte quella del Sole brucia le sue riserve di idrogeno in 10 milioni di anni, contro i 10 miliardi necessari al nostro astro. Le stelle più grandi sono destinate ad ardere in una breve e luminosissima fiamma, mentre l'evoluzione di un corpo come il Sole è molto più lenta. In qualche decina di milioni di anni la luce rossa iniziale del Sole si è trasformata nella gialla attuale. Il Sole ha probabilmente una quantità di combustibile nucleare sufficiente per altri cinque miliardi di anni. Successivamente diventerà una supergigante rossa e forse terminerà come nana bianca. Invece le stelle di massa maggiore possono esaurire il loro combustibile anche solo in un centinaio di milioni di anni, un periodo di tempo notevolmente inferiore all'età dell'Universo.

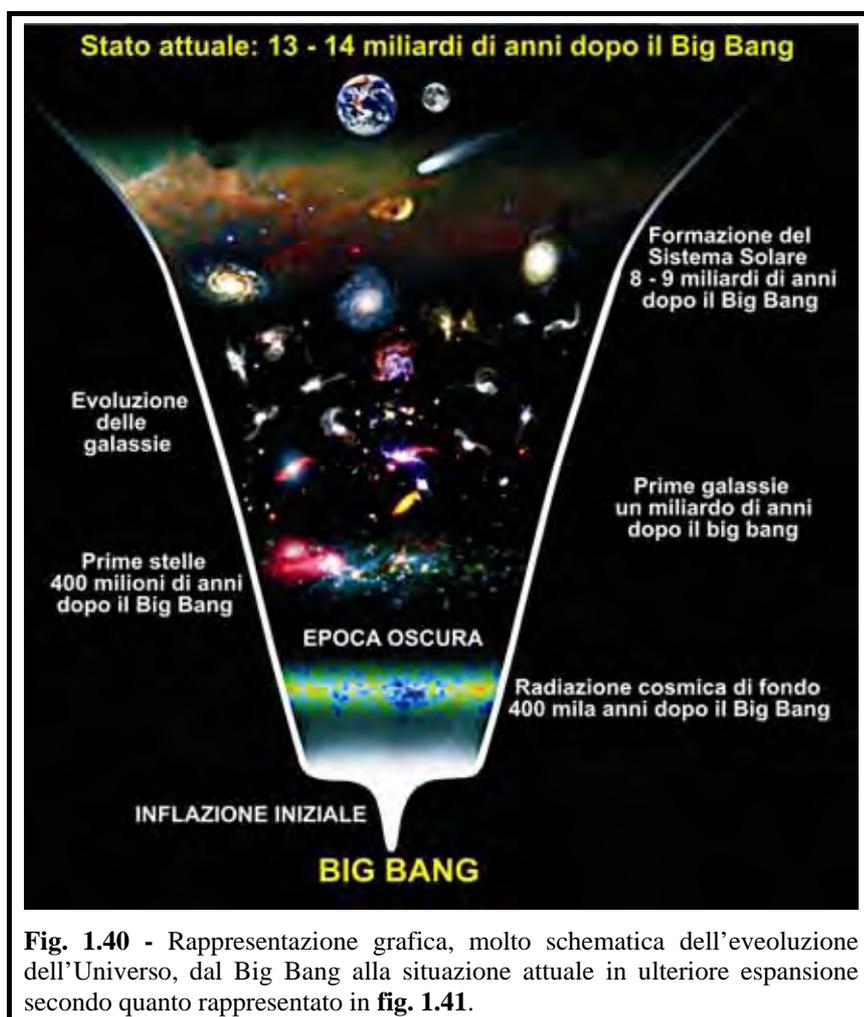


Fig. 1.40 - Rappresentazione grafica, molto schematica dell'evoluzione dell'Universo, dal Big Bang alla situazione attuale in ulteriore espansione secondo quanto rappresentato in **fig. 1.41**.

Quando una stella esaurisce il proprio combustibile e inizia a raffreddarsi, la forza di gravità ritorna a prevalere provocando una contrazione che, a sua volta, avvicina gli atomi sempre più velocemente gli uni contro gli altri: la stella diventa nuovamente più calda e la temperatura diventa così elevata (100.000 milioni di gradi) da innescare la fusione dell'elio in elementi più pesanti, come il carbonio e l'ossigeno. Con questo processo non viene prodotta molta energia. Ciò probabilmente consente alle regioni centrali della stella di contrarsi fino ad uno stato estremamente denso, come un **buco nero**, termine coniato nel 1969 dallo scienziato americano John WHEELER. John MICHELL scrisse nel 1783 un saggio nel quale affermava come una stella di massa e densità sufficientemente elevate avrebbe manifestato un campo gravitazionale talmente forte che neppure la luce sarebbe riuscita a sfuggirne; ogni raggio luminoso emesso sarebbe stato trascinato indietro dall'attrazione gravitazionale prima di spingersi molto lontano. Tali oggetti si presentano come spazi vuoti e neri nel cosmo.

A volte, quando una stella di massa molto grande collassa su se stessa, è possibile che le sue regioni esterne vengano espulse in una tremenda esplosione; nel giro di ore o di pochi giorni, la luminosità sale fino a 60.000 volte quella del Sole, creando l'illusione di formazione di una nuova

stella (**nova**). In poco tempo (giorni o anni) decresce la luminosità e, per alcune stelle, il fenomeno si ripete più volte in pochi decenni (**nove ricorrenti**). Se l'esplosione coinvolge l'intera massa si ha una **supernova**, talmente luminosa (anche 100 milioni di volte quella del Sole) da emettere più luce della somma di tutte le altre stelle della sua galassia. Un esempio ci è dato dalla supernova Crab Nebula, nella costellazione del Granchio, la cui esplosione venne registrata dai cinesi nel 1054. Anche se la stella esplosa si trovava a 5000 anni-luce di distanza, rimase osservabile a occhio nudo per mesi, visibile persino di giorno. Una supernova che si trovasse a 500 anni-luce (un decimo di quella distanza) sarebbe cento volte più luminosa e potrebbe letteralmente trasformare la notte in giorno. Per comprendere la violenza di una tale esplosione, basti pensare che la sua luce riuscirebbe a competere con quella del Sole, pur essendo decine di milioni di volte più lontana.

Se l'esplosione di una supernova avvenisse a una distanza sufficientemente ridotta, potrebbe lasciare la Terra intatta, ma emettere una quantità di radiazioni sufficiente a uccidere tutti i viventi. In effetti, di recente è stata avanzata l'ipotesi che un'estinzione di creature marine avvenuta tra il Pleistocene e il Pliocene (due milioni di anni fa) sia stata causata dalle radiazioni cosmiche provenienti da una supernova dell'agglomerato di stelle Scorpione-Centauro. Alcuni scienziati ritengono che le forme di vita più avanzate abbiano concrete probabilità di evolversi unicamente nelle regioni delle galassie dove non ci siano troppe stelle (le cosiddette "zone di vita"), poiché nelle regioni più dense i fenomeni come le supernove sarebbero abbastanza comuni da spegnere regolarmente ogni principio di evoluzione. Nell'intero Universo esplodono in media centinaia di migliaia di supernove ogni giorno. In una singola galassia, una supernova si verifica circa una volta ogni secolo. Ma questa è soltanto la media. L'ultima supernova registrata nella Via Lattea risale al 1604, prima dell'invenzione del telescopio. La principale candidata a diventare la prossima supernova nella nostra galassia è una stella chiamata Rho Cassiopeiae, alla distanza di 10.000 anni-luce, sufficiente per restare tranquilli. Appartiene a una classe di stelle note come ipergiganti gialle (nella Via Lattea ne sono state individuate in tutto soltanto sette).

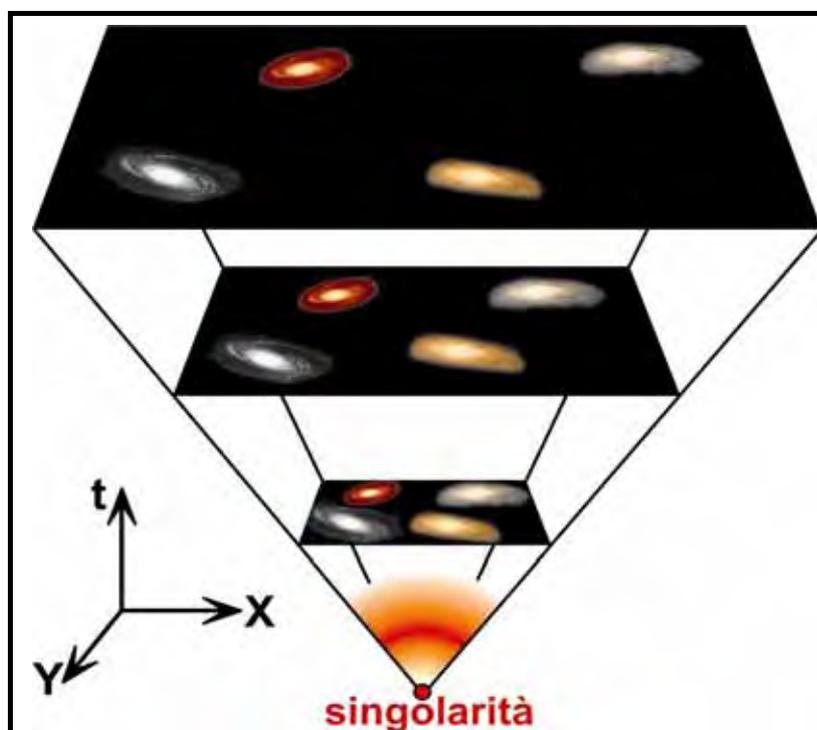


Fig. 1.41 - Rappresentazione "artistica" dell'espansione dell'Universo, raffigurato in tre sole dimensioni (due di spazio "X" e "Y" e una di tempo "t"), anziché in 4 (tre di spazio e una di tempo).

La radiazione cosmica di fondo, che è stata emessa con il Big Bang, proviene da materia che oggi si trova a circa 46 miliardi di anni luce. Questa distanza definisce approssimativamente i limiti dell'Universo osservabile.

Nell'universo gli oggetti molto lontani, si allontanano da noi (e noi da loro) con una velocità maggiore rispetto a quelli più vicini. Gli scienziati hanno verificato che oggetti, come i quasar, distanti $13 \cdot 10^9$ anni luce, si allontanano da noi ad una velocità molto vicina a quella della luce (poco meno di 300.000 km/s). Mentre la velocità di allontanamento di oggetti vicini, è molto più bassa, nell'ordine di decine o centinaia di km/s. Si deduce che probabilmente l'Universo è iniziato con una grande velocità di espansione, diminuita con il passare del tempo.

Considerato che la teoria della relatività ci dice che nulla può viaggiare alla velocità della luce e quindi nemmeno superarla, se ne può dedurre che se un oggetto distante $13 \cdot 10^9$ anni luce ha una velocità di allontanamento di 270.000 km/s, esso si trova, nello spazio e nel tempo, molto vicino al periodo della nascita dell'Universo e che quindi non può avere un'età superiore a 15 miliardi di anni. In realtà, le cose non stanno così semplicemente. Esistono teorie alternative. Molte chiamano in causa una espansione iniziale di tipo inflazionistico, cioè una espansione non graduale nel tempo, ma molto più violenta, con una espansione, nei primissimi istanti, molto superiore alla velocità della luce, che è andata successivamente diminuendo.

Le scoperte in questo campo continuano. Osservazioni effettuate nel 1998 sulla distanza di alcune galassie lontane hanno evidenziato che la velocità di espansione dell'Universo non sta diminuendo, ma sta ancora aumentando, come se ci fosse una forza che si oppone alla gravità. In tal caso forse l'età dell'Universo è superiore ai 14 miliardi di anni come fino ad ora ipotizzato.

Durante l'esplosione di una supernova, alcuni degli elementi più pesanti prodotti nelle fasi finali della vita della stella vengono rigettati nel gas della galassia e forniscono parte della materia prima per la successiva generazione di stelle, mentre dell'astro originario può rimanere una nube di gas o una stella a neutroni. Le stelle a neutroni sono molto piccole (**fig. 1.24**) e possiedono una energia gravitazionale spaventosamente alta; parte di questa si trasforma in energia cinetica; la conseguenza è un notevole incremento della velocità di rotazione, fino a trenta giri al secondo, come si è constatato con le **pulsar**.

Il Sole contiene circa il 2 % per cento degli elementi più pesanti. Esso è una stella formata 5/6 miliardi di anni fa da una nube di gas in rotazione che conteneva i detriti di precedenti supernove. La maggior parte del gas di quella nube andò a formare il Sole o si disperse intorno ad esso, ma piccole quantità degli elementi più pesanti si raccolsero insieme per formare i corpi che oggi orbitano intorno al Sole, come la Terra e gli altri pianeti. L'oro dei nostri gioielli e l'uranio dei nostri reattori nucleari sono entrambi residui delle supernove che si sono verificate prima della nascita del nostro Sistema Solare.

Immediatamente dopo la sua formazione, la Terra era molto calda e priva di atmosfera. Nel tempo, si raffreddò e acquistò una atmosfera in seguito all'emissione di gas dalle rocce. Questa atmosfera primitiva non conteneva ossigeno, ma molti altri gas, come l'acido solfidrico (dal caratteristico odore di uova marce). Ci sono però forme primitive di vita che possono prosperare in condizioni simili. Si pensa che esse si siano sviluppate negli oceani, forse in seguito a combinazioni casuali di atomi che diedero origine a strutture più grandi (macromolecole), le quali erano dotate della capacità di assemblare altri atomi presenti nell'oceano, formando strutture via via più complesse. In tal modo, esse avrebbero iniziato a riprodursi e a moltiplicarsi. In alcuni casi, durante questa riproduzione si saranno verificati degli errori, la maggior parte dei quali tali da impedire alle nuove macromolecole di riprodursi. Tuttavia, alcuni errori avranno anche portato alla formazione di nuove macromolecole in grado di riprodursi con maggiore efficacia. Grazie a tale vantaggio, queste ultime avranno poi tendenzialmente modificato le macromolecole originarie, dando inizio a quel processo evolutivo che condusse allo sviluppo di organismi autoriproduttivi sempre più complessi. Le forme primitive di vita consumavano le diverse materie prime disponibili negli ambienti marini (gli unici nei quali era possibile la vita) ed alcune cominciarono a liberare ossigeno. Ciò venne gradualmente a cambiare la composizione dell'atmosfera fino a condurla ai suoi valori attuali, permettendo la colonizzazione delle terre emerse e lo sviluppo di forme di vita superiori come i vertebrati (pesci, anfibi, rettili, uccelli e mammiferi).

Il XX secolo ha assistito alla trasformazione della nostra visione dell'Universo. Abbiamo compreso l'irrelevanza del nostro stesso pianeta nella vastità dell'Universo. Ma il Big Bang non è l'unica teoria cosmologica. Ne sono state proposte altre che hanno avuto meno successo. In particolare F. HOYLE, in collaborazione con altri scienziati, nel 1948, propose la **teoria della creazione continua**, secondo la quale l'Universo è uniforme nello spazio e nel tempo. In altri termini non esisterebbe un momento iniziale, ma uno *stato stazionario*, con una formazione continua di massa (idrogeno) ad un ritmo pari a quello con il quale la materia costituente le galassie, a causa dell'espansione, esce dal campo visivo. Più recentemente O. KLEIN e H. ALFVEN hanno proposto una ipotesi di **Universo pulsante** con periodicità di $35 \div 40$ miliardi di anni; cioè un modello che prevede delle "pulsazioni" alle quali corrisponderebbero momenti di fine e di inizio dell'Universo.

Negli ultimi anni le conoscenze si susseguono a ritmi sempre più elevati, grazie al lavoro dei fisici. Come sempre accade nella scienza, soprattutto nei settori comprendenti fenomeni non osservabili da vicino e non riproducibili in laboratorio, nuove scoperte permettono la formulazione di nuove teorie, l'accantonamento di altre o addirittura la rivalutazione di modelli prima ritenuti inadeguati. In particolare la questione cosmologica è uno degli esempi più evidenti di possibilità di nuove prospettive di ricerca e di formulazione di teorie.

SCHEDA 1.12 - La materia oscura

La materia esiste se la possiamo "vedere", o meglio se, in qualche modo, riusciamo a registrarne la presenza. Qualunque tipo di corpo materiale, vicino o lontano, per il fatto di possedere dell'energia, anche in minima quantità, è in grado di emettere radiazioni elettromagnetiche (**tab. 1.8**), le cui caratteristiche dipendono dalla temperatura del corpo stesso; se fosse "freddo" (o meglio poco "caldo") emetterebbe radiazioni con lunghezze d'onda lunghe e poco energetiche (es. radio, microne); se fosse "caldo" o "caldissimo" (decine di milioni di gradi) emetterebbe radiazioni più corte e più energetiche (es. raggi X). Qualunque corpo materiale emette una sorta di "luce" che siamo in grado di registrare con l'ausilio di sofisticati apparecchi e che, in alcuni casi, possiamo osservare direttamente con i nostri occhi. Questa materia che riusciamo in qualche modo "vedere" è costituita essenzialmente da particelle come neutrini ed elettroni, ma soprattutto da barioni (protoni e neutroni) e per tale motivo viene detta "*materia barionica*", essenzialmente quella costituente i corpi celesti come pianeti, stelle e galassie così come li "vediamo".

Le galassie a spirale (es. in **figg. 1.20 ÷ 1.22**) hanno un nucleo centrale denso di stelle e bracci a spirale avvolti attorno al nucleo che seguono il verso di rotazione dell'intera struttura. Ogni stella della galassia ruota con una propria velocità intorno al centro. Secondo le leggi della fisica classica la velocità tangenziale di una stella dovrebbe diminuire all'aumentare della distanza dal centro della galassia, con un meccanismo simile a quello che regola la rivoluzione dei pianeti intorno al Sole (quelli più vicini sono più veloci di quelli più lontani). Invece ripetute misure astronomiche hanno dimostrato una maggiore velocità delle stelle più esterne. Per giustificare tale situazione bisogna ammettere la presenza di una massa ben superiore di quella "visibile", diffusa nell'alone di ogni galassia, una massa che "deve" esistere, ma che non riusciamo a "vedere".

Si stima che nell'Universo vi siano circa 100 miliardi di galassie e che ciascuna di esse sia in media composta di circa 100 miliardi di stelle. Le galassie, a loro volta, sono raggruppate in insiemi detti "**gruppi**" (meno di 50 galassie) e "**ammassi**", i più grandi dei quali possono contenere anche 1.000 galassie (**fig. 1.42**). Quando sono osservati visualmente, gli ammassi sembrano essere insiemi ruotanti di galassie tenuti assieme dalla mutua attrazione gravitazionale. Tuttavia le velocità delle galassie nella rotazione dell'ammasso sono troppo alte perché possano rimanere assieme, il che implica la presenza di una componente "invisibile di massa". Le osservazioni con i raggi X hanno rivelato la presenza di grandi quantità di gas intergalattico, molto caldo (decine di milioni di gradi) e quindi in grado di emettere raggi X. La massa totale di tali gas è più grande, di centinaia di volte, di quella delle galassie. Anche considerando la massa dei gas, quella totale (barionica) non è sufficiente per tenere assieme l'ammasso. La massa totale è molto più alta e la componente mancante, o meglio quella non "visibile", è detta **materia oscura**, analoga a quella succitata a proposito di ogni singola galassia e che "deve" esistere per

garantire l'esistenza della galassia stessa. In un ammasso tipico, solo il 5 % della massa totale è sotto forma di galassie, forse il 10 % come gas intergalattico caldissimo che emette raggi X e il resto come materia oscura, ancora sconosciuta e probabilmente di forma non barionica.

La presenza di materia oscura, la ricerca sulle sue caratteristiche e soprattutto la sua valutazione quantitativa nell'Universo è molto importante, in quanto la conoscenza della "massa totale" influisce in modo determinante sulle ipotesi evolutive dell'Universo.

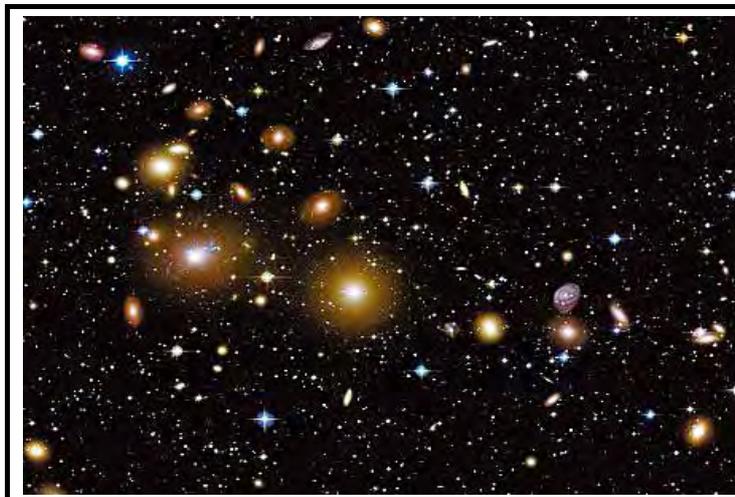


Fig. 1.42 - L'Ammasso di Perseo è uno dei più noti e contiene oltre 1.000 galassie. Ciascuno degli oggetti nella foto è una galassia come la Via Lattea (**fig. 1.20**) o l'Andromeda (**fig. 1.21**), ciascuna con miliardi di stelle come il nostro Sole (e molto più grandi).

SCHEDA 1.13 - Origine del sistema solare

La formulazione di ipotesi sull'origine del Sistema Solare fa riferimento alle seguenti osservazioni:

- la massa del Sistema Solare è notevolmente concentrata nel Sole (quasi mille volte la somma di tutti i pianeti e dei satelliti);
- vi è grande differenza fra le caratteristiche fisiche e chimiche dei corpi che costituiscono il Sistema Solare;
- i pianeti più piccoli della Terra (Mercurio, Venere, Marte e Plutone) sono costituiti da materiali di densità più elevata rispetto ai grandi pianeti (Giove, Saturno, Urano e Nettuno);
- le distanze fra i pianeti e il Sole sono regolate da una funzione matematica (legge di TIETZ e BODE; **fig. 1.18**);
- massa e volume di Giove sono più grandi rispetto alla somma di tutti gli altri corpi del Sistema Solare;
- le orbite dei pianeti giacciono, grosso modo, sullo stesso piano (ad eccezione di Plutone);
- se si osserva il Sistema Solare dal Polo Nord celeste, tutti i pianeti procedono lungo le loro orbite in senso antiorario e tutti ruotano nello stesso senso intorno al loro asse (ad eccezione di Venere e Urano che ruotano in senso inverso);
- gli assi di rotazione di tutti i pianeti non si discostano molto dalla perpendicolarità rispetto ai piani delle orbite (ad eccezione di Urano il cui asse è quasi parallelo);
- tutti i satelliti compiono le rivoluzioni attorno ai rispettivi pianeti nello stesso senso di tutti gli altri movimenti di rotazione del Sistema Solare;
- i pianeti possiedono un numero molto variabile di satelliti;
- nel Sistema Solare, oltre ai pianeti e ai loro satelliti, vi sono altri corpi come asteroidi, comete e meteoriti; essi compiono orbite ruotando nello stesso verso (antiorario) come se **l'intero Sistema Solare ruotasse intorno al Sole e insieme al Sole**.

La prima importante teoria dell'origine del Sistema Solare si deve al filosofo tedesco E. KANT (1724 - 1804). Tutto avrebbe avuto origine da una nube di gas e di polvere cosmica ruotante intorno ad una asse. In diversi punti la materia si sarebbe concentrata dando origine al Sole e a tutti gli altri corpi del sistema (pianeti, satelliti e frammenti di varie dimensioni).

Il francese P.S. LAPLACE (1749 - 1827) sviluppò ulteriormente tale teoria nel lavoro "*Esposizione del sistema del mondo*", pubblicato nel 1796. La nube, contraendosi, avrebbe dato origine ad un globo prevalentemente gassoso e incandescente, ruotante su se stesso in senso antiorario, sempre più velocemente (come un ballerino su ghiaccio che ruota più rapidamente quando avvicina le braccia al corpo concentrando la massa sull'asse di rotazione). Quel globo, poco "compatto", si sarebbe rigonfiato in corrispondenza dell'equatore, dal quale si sarebbero staccati, in diverse fasi, materiali che si sarebbero allontanati a diverse distanze, andando a costituire degli anelli ruotanti nello stesso senso antiorario; essi essendosi staccati dalla stessa zona rigonfia del globo originario, si sarebbero disposti tutti su uno stesso piano. Il globo centrale si sarebbe poi trasformato nel Sole e gli anelli concentrati nei pianeti e in frammenti minori (satelliti). Questo processo non sarebbe stato perfettamente regolare; quindi avrebbe dato origine a corpi di minori dimensioni che avrebbero subito una evoluzione molto diversa (comete, asteroidi, meteorite). L'ipotesi di Laplace fu ritenuta valida per oltre un secolo, ma vi erano diverse contraddizioni. Se tutta la massa dei pianeti venisse unita a quella solare, il rigonfiamento equatoriale risulterebbe di appena il 5 % del diametro medio, non sufficiente a determinare alcun distacco di anelli (**fig. 1.43**).

Secondo gli americani T. C. CHAMBERLIN e F. R. MULTON (1905) la formazione dei pianeti sarebbe dovuta all'emissione di materia solare provocata dall'attrazione di una stella passata molto vicina al Sole. Tale materia avrebbe generato, per condensazione, numerose masse elementari (detti planetesimi) che a loro volta avrebbero generato i pianeti. Bisogna tuttavia

osservare che l'incontro tra due stelle è un avvenimento rarissimo ed inoltre non è chiaro come da corpuscoli diversamente disseminati nello spazio possono essersi formati corpi celesti così regolari nella forma ed ordinati nel movimento.

Più interessante è la *teoria delle maree*, dovuta all'inglese H. JEANS (1916). Una grossa stella, passando a distanza ravvicinata al Sole (evento comunque molto improbabile) avrebbe provocato, per attrazione, il sollevamento di un grande flusso di materia (marea solare). Questo enorme getto, sottoposto contemporaneamente all'attrazione Sole - stella, si sarebbe prima allungato, assottigliandosi soprattutto alle estremità, poi spezzato in frammenti che, raffreddandosi e condensando, avrebbero originato i pianeti. In questo modo si spiegherebbe la presenza dei grossi pianeti (come Giove e Saturno) che si trovano alle distanze intermedie dal Sole, mentre quelli più piccoli si trovano alle estremità (i più vicini e i più lontani).

Una ipotesi molto accreditata è quella del tedesco VON WEIZSACKER (poi sviluppata dall'americano KUIPER). Il Sole, nel suo viaggio nell'Universo, avrebbe catturato una grande massa nebulara (un insieme di gas e polveri cosmiche con una massa di circa 1/10 di quella solare) con un diametro molto simile a quello dell'orbita del pianeta più distante. Questa nebulosa avrebbe dovuto essere dotata di un moto di rotazione (antiorario) e pertanto si sarebbe appiattita formando una specie di disco; le diverse parti di esso sarebbero state dotate di diverse velocità periferiche determinando la formazione di vortici, a loro volta orbitanti tutti nello stesso verso attorno al Sole. I vortici avrebbero "inghiottito" materia condensandola in *protopianeti*, nelle posizioni dei pianeti attuali. Questa teoria è quella che, più di altre, spiega molte delle osservazioni sul Sistema Solare. La composizione dei protopianeti sarebbe stata non molto diversa da quella del Sole; successivamente essi, oltre a raffreddarsi, avrebbero perduto nello spazio una certa quantità degli elementi più leggeri, tanto maggiore quanto minore era la loro massa; ciò spiega il motivo per cui gli attuali piccoli pianeti sono costituiti da materiali con maggiore densità rispetto a quelli grandi. Inoltre il fatto che tutti abbiano avuto origine da una nebulosa a forma di disco, spiega la ragione per cui hanno orbite che giacciono sullo stesso piano. La *Prototerra* (prima della graduale perdita nello spazio dei materiali più leggeri) avrebbe dovuto avere una massa mille volte più grande dell'attuale, mentre il Protogiove soltanto dieci o venti volte maggiore. I moti di rotazione dei pianeti e quelli di rivoluzione nello stesso senso sarebbero conseguenza dell'origine comune dal disco la cui materia ruotava, in tutte le sue parti, in senso antiorario. I satelliti avrebbero avuto origine mediante un processo analogo a quello dei pianeti, mentre la formazione degli asteroidi e delle comete sarebbe legata alla presenza di zone più rarefatte nella nebulosa originaria.



Fig. 1.43 - Il sole è una stella formatasi 5/6 miliardi di anni fa da una nube di gas in rotazione che conteneva i detriti di precedenti supernove (in alto a sinistra dell'immagine è rappresentata l'esplosione di una supernova). La maggior parte del gas di quella nube andò a formare il Sole o si disperse intorno ad esso, ma piccole quantità degli elementi più pesanti si raccolsero insieme per formare i corpi che oggi orbitano intorno al Sole, come la Terra e gli altri pianeti con una evoluzione simile a quella relativa all'ipotesi di LAPLACE.

Porsi interrogativi sull'origine del Sistema Solare, significa anche chiedersi l'età del Sole e della Terra. In base alla cronologia biblica, il vescovo irlandese James USSHER affermò che il Mondo fu creato il 24 ottobre del 4004 a.C., alle ore nove del mattino. Il naturalista francese G. L. BUFFON (1707 - 1788) prima in "*Théorie de la Terre*" e poi in "*Epoques de la Nature*", confuta tutta la cosmogonia precedente, già scossa da Newton, dilatando la cronologia della Terra fino a retrodatarne l'origine dai 6.000 anni della Bibbia a 60.000 anni. Arriverà in seguito ad ipotizzare un tempo di quasi tre milioni di anni. Poca cosa rispetto a quanto conosciamo oggi; tuttavia bisogna riconoscere che si trattò del primo tentativo basato su un principio fisico, cioè sul presumibile tempo di raffreddamento di un globo fuso con le dimensioni del nostro pianeta. Buffon inoltre considerava il Sole più antico e che la materia terrestre fosse stata sottratta all'astro maggiore in conseguenza del passaggio di una cometa.

Il secolo successivo vede l'affermarsi delle intuizioni di Buffon soprattutto in campo fisico. La polemica divampa in campo geologico, fisico e biologico dal momento in cui KELVIN (1824 - 1907) calcola la durata della storia della Terra in tempi dell'ordine del centinaio di milioni di anni: un lasso di tempo considerevole, ma assolutamente insufficiente ad esempio per le ipotesi di evoluzione delle forme viventi. I calcoli di Kelvin si riveleranno del tutto inattendibili perché basati su un meccanismo chimico di produzione dell'energia solare, che non permetteva una durata di esistenza del Sole, e di riflesso del nostro pianeta, dell'ordine di grandezza attualmente riconosciuto corretto. Kelvin, d'altro canto, non poteva ancora conoscere la fusione nucleare. Attualmente, mediante l'elaborazione dei dati ottenuti con i metodi di datazione dei materiali costituenti la superficie terrestre, basati sugli elementi radioattivi in essi contenuti, si è arrivati a stabilire **l'età della Terra pari a 4,5 miliardi di anni, mentre l'età del Sole pari a 5/6 miliardi di anni.**