2 - FORMA, DIMENSIONI E MASSA DELLA TERRA

2.1 - La forma della Terra

Fig. 2.1 - Classica immagine del pianeta Terra da una navicella spaziale. In alto a sinistra compare anche la Luna.

Oggi disponiamo di immagini della Terra riprese da satelliti artificiali (**fig. 2.1**)**:** Il pianeta appare come una sfera prevalentemente azzurra con poche "macchie" (terre emerse) di diverso colore alternate ad ampie estensioni più chiare, spesso sfilacciate (nubi). Molto prima dell'avvento delle navicelle spaziali si era a conoscenza della forma sferica della Terra, come è dimostrato dall'uso del "mappamondo", utilizzato in Geografia in epoche precedenti le prime avventure spaziali. Ma come si percepisce la "rotondità" della Terra senza disporre dei complessi strumenti che si trovano a bordo dei satelliti artificiali dal momento che il panorama intorno a noi appare "piatto"**?**

Osservando le imbarcazioni prendere il largo, esse sembrano affondare gradualmente sotto l'orizzonte; quindi la superficie del mare è leggermente curva (**fig. 2.2**). L'impressione della lieve curvatura si ha anche osservando un ampio orizzonte sgombro da ostacoli (per esempio la superficie del mare da una nave al largo) che appare come un cerchio tutt'intorno. Ulteriore conferma si ottiene osservando la luce del Sole, appena tramontato, sulle nubi alte o sulle cime delle montagne.

Il primo che dimostrò la sfericità del nostro pianeta (e di conseguenza il suo isolamento nello spazio) fu il navigatore portoghese MAGELLANO, il quale, all'inizio del XVI secolo, riuscì nell'intento di circumnavigare il globo. Spetta alla cultura greca il merito di aver individuato la forma sferica della Terra (già intuita dagli astronomi Egizi). PITAGORA (sec. VI a.C.) aveva già osservato che una singola stella, nel medesimo istante, appare ad altezze diverse sull'orizzonte a seconda dei luoghi da cui viene osservata.

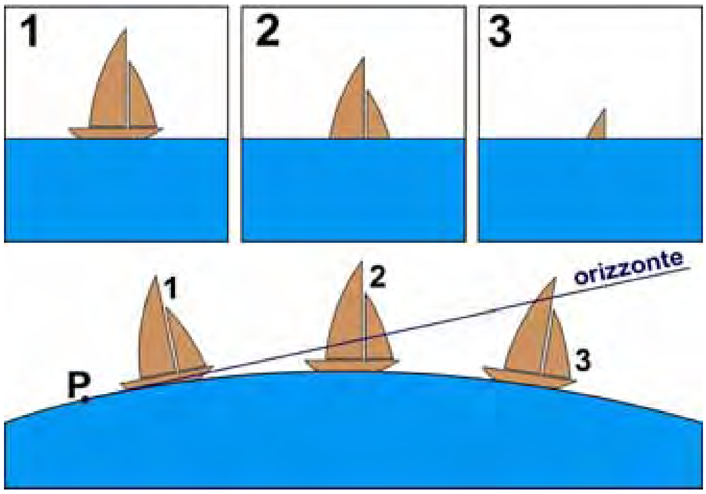


Fig. 2.2 - Una prova a sostegno della curvatura della superficie terrestre è l'osservazione di una imbarcazione che gradualmente scompare all'orizzonte.

2.2 - La Terra e le stelle

Le stelle sono utili punti di riferimento. Muovendosi nel cielo conservano immutate le posizioni reciproche formando le costellazioni. Individuata una stella è possibile misurare la sua altezza sull'orizzonte in un certo momento. La linea che unisce l'osservatore e la stella forma, con l'orizzonte, un angolo (**fig. 2.3**), il cui valore (espresso in gradi) è l'**altezza della stella sull'orizzonte**. Se essa si trova sopra l'osservatore (90°) si dice che è in direzione dello **Zenit**; se si trova ad una altezza di 0°, si dice che è sulla linea dell'orizzonte. La misura dell'altezza di una stella sull'orizzonte viene effettuata con il "sestante", classico strumento dei naviganti. La distanza della Terra dalle stelle è enormemente grande rispetto alle sue dimensioni (il suo diametro è miliardi di volte più piccolo rispetto alla stelle più vicine). Di conseguenza le linee di mira da diversi punti della superficie terrestre verso una stella sono parallele. Se la Terra fosse piatta, due osservatori in due punti diversi misurerebbero, di una stessa stella e nello stesso momento, una uguale altezza sull'orizzonte (**fig. 2.4**); in realtà, dato che la superficie terrestre è curva, la misura risulterà diversa per i due osservatori.

La **stella polare** fa parte della costellazione dell'Orsa Minore (**fig. 2.5**); essa si trova allo Zenit rispetto al Polo Nord (all'altezza di 90° sull'orizzonte) ed è l'unica a non spostarsi nella volta celeste, in quanto si trova sull'asse di rotazione terrestre; ciò la rende adatta come riferimento fisso per determinare la posizione di un punto qualunque sulla superficie della Terra nell'emisfero Nord, indipendentemente dal momento dell'osservazione (**fig. 2.6**). Nell'emisfero Sud la Stella Polare non è visibile; vi è un'altra stella, *Sigma Octantis*, ma poco luminosa; tuttavia osservazioni simili possono essere compiute con altre stelle.

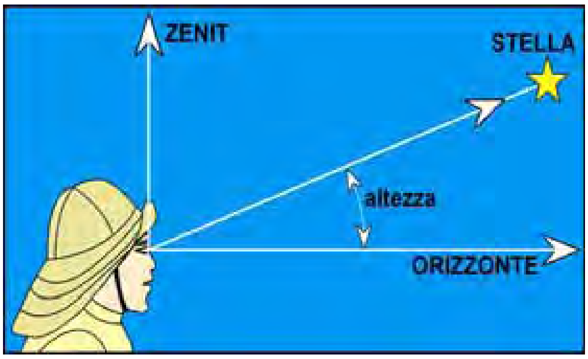


Fig. 2.3 - L'**altezza** di una **stella** è l'angolo compreso fra il piano dell'**orizzonte** e la linea di mira fra l'osservatore e la stella stessa. Lo **Zenit** si trova ad una altezza di 90°.

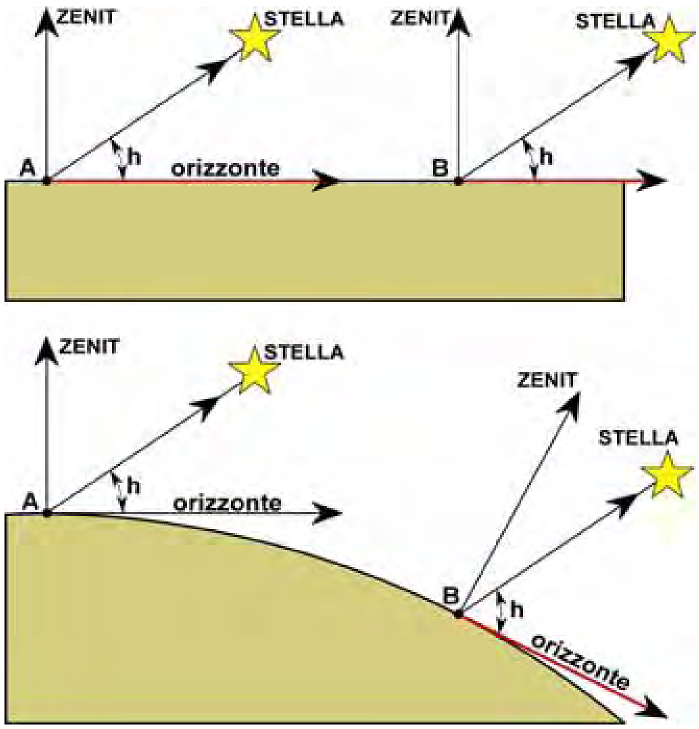
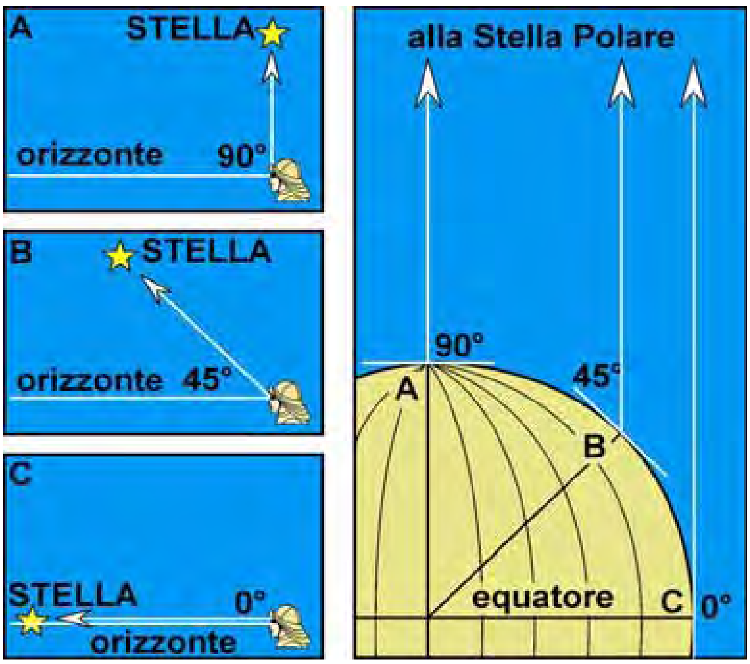


Fig. 2.4 - Se la superficie della Terra fosse piatta, l'altezza (**h**) della **Stella** sull'**orizzonte** sarebbe uguale da punti di osservazione (**A** e **B**) anche molto distanti fra loro (in alto), così come sarebbe identica la direzione di mira vero lo **Zenit**. In realtà osservazioni da punti diversi comportano diverse altezze (in basso).



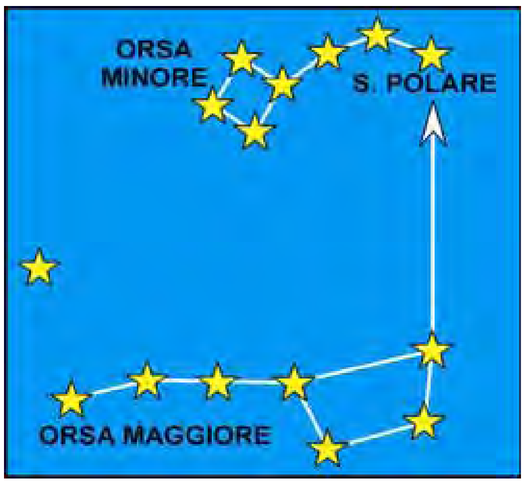


Fig. 2.5 - La **Stella Polare** fa parte della Costellazione dell'**Orsa Minore**. Essa si trova sull'asse di rotazione terrestre e mantiene sempre la stessa posizione nella volta celeste, diventando così un sicuro punto di riferimento.

Fig. 2.6 - Dalla misura dell'altezza della **Stella Polare** sull'orizzonte si può determinare, nell'emisfero Nord, la posizione dell'osservatore sulla superficie terrestre.

2.3 - Orientamento (localizzazione di un punto sulla Terra)

Se immaginiamo di tagliare una sfera con superfici piane si ottengono circonferenze (**fig. 2.7**). Se il piano interseca la sfera vicino alla sua superficie si ottiene un piccolo cerchio; per ottenere cerchi più grandi il piano secante deve passare vicino al centro della sfera. La circonferenza di maggiori dimensioni (*cerchio massimo*) si ottiene con il piano passante per il centro della sfera. Se il piano è perpendicolare all'asse di rotazione terrestre il cerchio massimo che si ottiene è l'**equatore** (**fig. 2.7**), che divide la sfera in due metà o "emisferi"**: emisfero**

boreale (Nord) ed **emisfero australe** (Sud). Tanti piani che tagliano la sfera parallelamente a quello equatoriale formano i **paralleli,** circonferenze via via più piccole verso i poli.

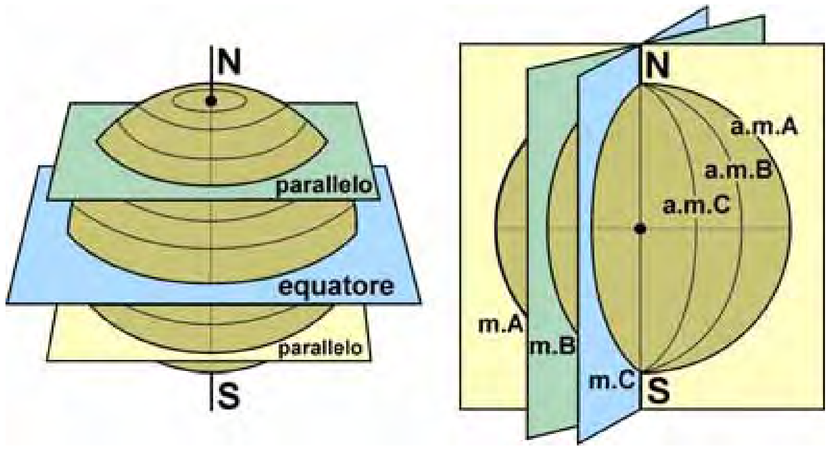


Fig. 2.7 - L'intersezione della sfera terrestre con piani, da origine a cerchi. Sono detti **paralleli** quelli originati da piani perpendicolari all'asse di rotazione tra cui l'**equatore** è il cerchio massimo (a sinistra). I piani, passanti per il centro (a destra) e perpendicolari al piano che origina l'equatore, formano, con l'intersezione della sfera terrestre, i **meridiani**. Paralleli e meridiani costituiscono il *reticolato geografico*.

La distanza di un punto sulla superficie terrestre dall'equatore, nell'emisfero boreale, è valutata misurando, da quello stesso punto, l'altezza della Stella Polare sull'orizzonte. La Stella Polare appare sull'orizzonte (0°) se il punto si trova sull'equatore; è allo zenit (90°) se il punto si trova al Polo Nord (**fig. 2.6**). In un punto intermedio (tra l'equatore e il Polo) l'altezza è compresa tra 0° e 90°. *L'altezza, espressa in gradi, della Stella Polare sull'orizzonte osservata da una posizione qualunque, sull'Emisfero Nord, è una* **coordinata geografica** *detta* **latitudine** (β in **fig. 2.8**). Meglio sarebbe utilizzare l'espressione **latitudine Nord**, per distinguere da **latitudine Sud**, che indica una distanza di un punto qualunque dall'equatore nell'Emisfero Australe. Valgono alcuni esempi**:** Caracas, in Venezuela, si trova a 10° di latitudine Nord; Filadelfia, negli U.S.A. a 40° lat. Nord. La regione della Terra del Fuoco (estremo Sud dell'America Latina) si trova a 55° latitudine Sud; l'Italia è compresa fra 37° lat. Nord di Siracusa e 47° lat. Nord della porzione settentrionale del Trentino Alto Adige. I circoli polari artico e antartico si trovano a 66° 30' di latitudine Nord e Sud rispettivamente; i tropici del Cancro e del Capricorno si trovano a 23° 30' di latitudine Nord il primo e Sud il secondo.

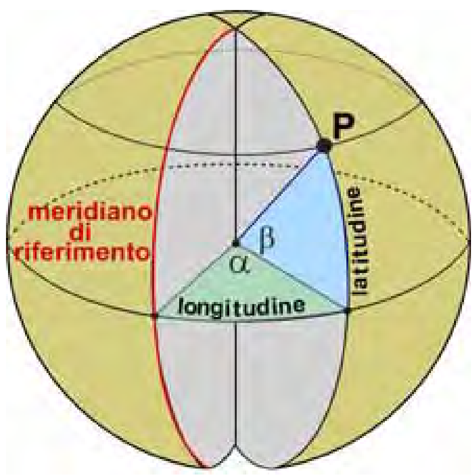


Fig. 2.8 - La latitudine (β) di un punto **P** è l'angolo compreso fra la linea congiunte il centro della terra con il punto stesso ed il piano equatoriale. La longitudine (α) di **P** è l'angolo compreso tra il piano che origina il **meridiano di riferimento** (Greenwich) e quello del meridiano sul quale si trova il punto.

Il piano che interseca la sfera in corrispondenza di un punto che si trova, per esempio, a 45° di latitudine Nord, forma un parallelo la cui circonferenza misura circa 28.000 km (sul quale, o vicino ad esso, si trovano città come Torino, Bordeaux in Francia, Bucarest in Romania o regioni come la Mongolia in Asia e diversi Stati degli U.S.A.). Quindi per individuare un punto del quale si conosce soltanto la latitudine Nord di 45° occorrerebbe cercare lungo un percorso, compiendo il giro della Terra, che risulterebbe di circa 28.000 km. Risulterebbe una impresa impossibile; una sola coordinata geografica non è sufficiente. Si rende necessario indicare anche in quale posizione della circonferenza, che rappresenta il quarantacinquesimo parallelo, si trova il punto e cioè una "seconda coordinata geografica".

Immaginiamo ora di intersecare la sfera Terra con piani perpendicolari a quelli che hanno dato origine ai paralleli, facendoli passare per il centro del globo (quindi allineati con l'asse di rotazione terrestre). Si ottengono tanti cerchi massimi denominati **meridiani** (**fig. 2.7**). Il meridiano che passa per la posizione in cui si trova l'*Osservatorio Astronomico di Greenwich*, presso Londra, è stato assunto, per accordo internazionale nel 1884, come **meridiano fondamentale** (o **meridiano di riferimento**). A differenza dei paralleli, i meridiani hanno tutti la stessa circonferenza; ogni parallelo, inoltre, è tagliato, in modo ortogonale, dai meridiani.

Per un punto che si trova sul parallelo 45° Lat. Nord passa un meridiano ottenibile dall'intersezione della sfera Terra con un piano che forma un angolo con quello che origina il meridiano fondamentale. Quell'angolo rappresenta la seconda coordinata geografica indispensabile, insieme alla latitudine, per l'esatta determinazione di una posizione sulla superficie della Terra e viene indicato con il termine **longitudine** (α in **fig. 2.8**). Ma due punti possono trovarsi sulla stessa longitudine ai due lati del meridiano fondamentale; quest'ultimo, inoltre, divide il mondo in due metà. Se un osservatore si pone sul meridiano di Greenwich con le spalle all'equatore e guarda verso il Polo Nord, alla sua destra è l'**oriente** (**Est**) ed alla sua sinistra è l'**occidente** (**Ovest**). Così come nell'indicare la latitudine di un punto è necessario evidenziare se esso si trova nell'emisfero boreale (Nord) o australe (Sud), allo stesso modo per indicarne la longitudine è necessario evidenziare se esso si trova a Est o ad Ovest del meridiano fondamentale.

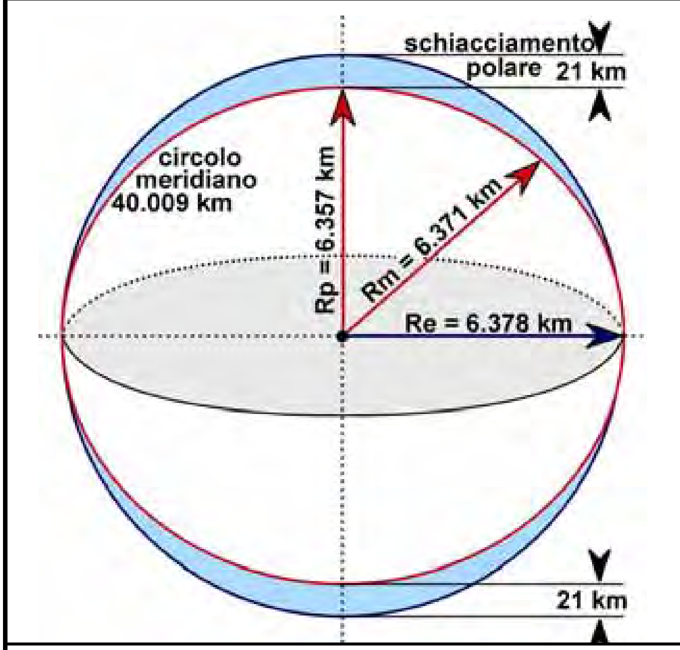
Da tutti i punti di uno stesso meridiano (indipendentemente dalla latitudine) si vede il Sole passare nella posizione più alta del cielo nello stesso istante; è il **mezzogiorno vero locale**. Tutti i punti di uno stesso meridiano, in qualunque momento del giorno, hanno lo stesso **tempo vero locale** (la stessa ora). La Terra compie un giro di rotazione su se stessa (360°) in 24 ore e quindi una rotazione di 15 gradi ogni ora (15°/h = un fuso orario; **scheda 2.1**) oppure di 1 grado ogni 4 minuti. Ciò vuol dire che punti distanziati di 15° di longitudine hanno una differenza di un'ora fra i loro tempi veri locali. Dato che, come meridiano di riferimento, è stato assunto quello di Greenwich, è sufficiente calcolare la differenza fra l'ora vera locale e l'ora di Greenwich per ricavare la longitudine. Se il tempo vero locale del punto di osservazione segna le ore 11, mentre il tempo di Greenwich segna le ore 7 (perché il punto si trova ad Est, dove il Sole sorge prima), la differenza è pari 4 ore**:** 4 ore per 15 gradi/ora = 60° long. Est. Se il tempo vero locale segna le ore 14 e 30 minuti mentre l'ora di Greenwich (ascoltata da una radio su una nave) segna le ore 9, risulterà 5,5 ore di differenza per 15 gradi/ora = 82° 30' long. Ovest (perché il Sole è sorto prima a Greenwich e pertanto il punto si trova ad Ovest del meridiano fondamentale).

Per individuare un punto sulla superficie terrestre sono necessarie le coordinate geografiche (latitudine e longitudine) quasi come in un diagramma cartesiano ottenibile, questo, dalla intersezione di due rette che dividono lo spazio in quattro quadranti in ciascuno dei quali è possibile individuare un punto con due semplici numeri o coordinate (ascissa sull'asse orizzontale ed ordinata su quello verticale). Anche la superficie della Terra è suddivisibile in quattro quadranti dall'intersezione dell'equatore con il meridiano fondamentale e precisamente le porzioni occidentale e orientale dell'emisfero Nord e occidentale e orientale dell'emisfero Sud. Per esempio Parigi (49° lat. Nord e 2° long. Est) si trova nella porzione orientale dell'emisfero boreale. Montevideo (in Uruguay, 35° lat. Sud e 55° long. Ovest) si trova nella porzione occidentale dell'emisfero australe. Due punti che hanno coordinate opposte si dicono agli **antipodi** (si trovano alle estremità di un diametro terrestre). Un punto con coordinate 60° lat. Nord e 20° long. Ovest (nell'emisfero boreale occidentale) è agli antipodi del punto con coordinate 60° lat. Sud e 160° long. Est (nell'emisfero boreale orientale). L'individuazione di un punto può essere approssimata con un margine di poche decine di metri ricorrendo a valori frazionari del grado sessagesimale (unità di misura fondamentale degli angoli); per esempio le coordinate geografiche del centro di Milano sono 45° 28' lat. Nord e 9° 11' long. Est (dove il primo vale 1/60 di grado).

2.4 - È realmente sferica la Terra?

Nel Medio Evo si riteneva che la Terra avesse forma piana; non si accettava l'idea di abitare su una sfera sospesa nello spazio e senza che gli abitanti agli antipodi cadessero nel vuoto sottostante. Fu l'umanesimo a riportare una visione meccanicistica dell'Universo. A seguito dei viaggi di MAGELLANO (1519 ÷ 1522) la Terra ritornava ad essere considerata sferica, come già Aristotele aveva intuito. Ma è realmente sferica la Terra? Precise misure sulle fotografie scattate dalle navicelle spaziali mostrano che non è una sfera perfetta (fatto comunque già verificato precedentemente per mezzo di calcoli e misurazioni); essa è in realtà *leggermente compressa ai poli.* Sarebbe meglio dire che **la Terra è leggermente rigonfia all'equatore**. Tale rigonfiamento era stato previsto da NEWTON (1642 ÷ 1727), ancor prima di essere osservato, quale effetto della rotazione della Terra intorno al suo asse (**fig. 2.9**). Quindi il raggio della Terra è leggermente minore ai poli e massimo in corrispondenza dell'equatore e il cerchio massimo dell'equatore non è uguale a quello di un meridiano. I meridiani non sono circonferenze perfette, ma ellissi poco eccentriche. Pertanto la forma della Terra non è una sfera, ma una *elissoide.* Nel 1924 fu adottato come modello l'**elissoide internazionale**, una figura geometrica regolare che si avvicina con la maggiore approssimazione alla reale forma della Terra. Le dimensioni furono stabilite sulla base di una serie di misure iniziate nel 1909 da J.F. HAYFORD del Servizio Geodetico degli Stati Uniti. Misure più precise, effettuate con i satelliti artificiali, hanno permesso di stabilire che lo schiacciamento è leggermente inferiore a quello previsto dall'elissoide internazionale e che vi è una leggera differenza (15 metri) tra i due raggi polari. Il Polo Sud è leggermente più schiacciato del Polo Nord, come se la Terra avesse (esagerando) la forma di una pera. I valori indicati dall'elissoide internazionale possono essere ritenuti, ancora oggi, sufficientemente precisi ed utili per la redazione delle carte geografiche più dettagliate.

La superficie della Terra non è liscia come appare da un satellite artificiale; essa è in realtà assai "rugosa". Si passa da altezze sul livello marino di 8.847 metri del monte Everest, fino a 11.022 metri sotto il livello del mare (Fosse delle Marianne). Se i continenti fossero intersecati da una fitta rete di gallerie e canali sufficientemente profondi da essere invasi dai mari, l'acqua si disporrebbe secondo una superficie (il pelo libero) non coincidente con l'elissoide internazionale ma leggermente più "gonfia" in corrispondenza dei continenti, soprattutto dove sono presenti elevate catene montuose e leggermente più "depressa" in corrispondenza dei mari, soprattutto in corrispondenza delle grandi profondità oceaniche. Questa forma "teorica" prende il nome di **geoide**; esso non è altro che l'elissoide internazionale con leggere depressioni e gibbosità che seguono l'andamento (quest'ultimo molto più pronunciato) delle depressioni marine e delle catene montuose continentali (**fig. 2.10**).



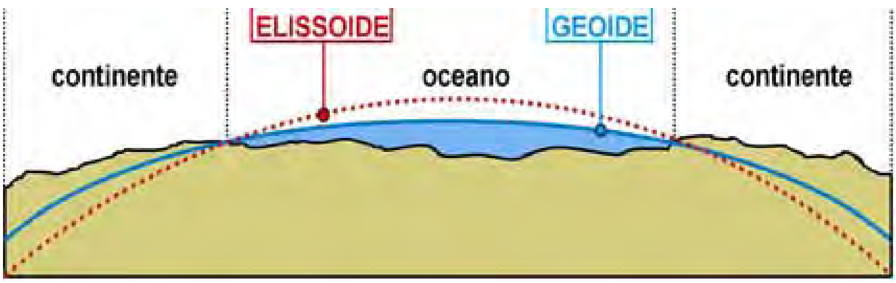
raggio massimo equatoriale	km	**6.378,4**
raggio minimo o polare	km	**6.356,9**
raggio medio terrestre	km	**6.371**
circonferenza equatore	km	**40.076,7**
circonferenza meridiano	km	**40.009,1**
superficie totale	km^2	**$5{,}10 \cdot 10^8$**
volume	km^3	**$1{,}083 \cdot 10^{12}$**
massa	kg	**$6 \cdot 10^{24}$**
densità	Kg/dm^3	**5,5**

Fig. 2.9 - Misure ufficiali (approssimate al kilometro) dell'elissoide internazionale secondo la convenzione del 1924 (**Rp** = raggio polare; **Rm** = raggio medio; **Re** = raggio equatoriale) a sinistra e misure fondamentali della Terra a destra.

2.5 - Dimensioni e massa della Terra

Le curiosità più immediate nei confronti di un qualunque oggetto sono essenzialmente *dimensioni* e *massa*. In tal modo sono possibili prime riflessioni circa il materiale di cui è costituito quell'oggetto, se non altro escludendo a priori certe possibilità. Per esempio se un pallina è pesante non potrà essere costituita da polistirolo, così come non potrà essere costituita da piombo se è molto leggera. Se al posto della pallina ragionassimo allo stesso modo nei confronti di una "palla" molto più grande, la Terra, potremmo arrivare a interessanti conclusioni che ci permetterebbero di raccogliere altre informazioni oltre a quelle relative alla forma.

Fig. 2.10 - La superficie del **geoide**, rispetto a quella dell'**elissoide internazionale**, è leggermente rigonfia in corrispondenza dei continenti e depressa in corrispondenza degli oceani. La massima differenza fra le due superfici non supera i 120 metri.



Abbiamo precedentemente affermato che già gli antichi proposero il modello a sfera della Terra e addirittura ne determinarono le dimensioni. ERATOSTENE, scienziato greco vissuto fra il terzo ed il secondo secolo prima di Cristo, riuscì a calcolare il raggio del globo ottenendo una misura pari a circa 6.300 km (**scheda 2.2**), valore molto vicino a quello medio dell'elissoide internazionale (6.371 km; **fig. 2.9**). Come già visto il raggio terrestre è leggermente inferiore in corrispondenza dei poli (6.378,4 km) e leggermente superiore in corrispondenza dell'equatore (6.356,9 km, circa 21 km in più rispetto al primo). Si possono quindi ottenere, con semplici calcoli, usando le formule della geometria della circonferenza, i corrispondenti diametri (12.756,8 km quello fra i poli e 12.713,8 km quello equatoriale) e le relative circonferenze (40.009,1 km quella del meridiano e 40.076,7 km quella equatoriale). Il dato più importante fra questi numeri è il **raggio medio terrestre** (**6.371 km**) rappresentativo delle dimensioni della Terra assunta approssimativamente ad una sfera. Il valore del raggio medio "**R**" può essere utilizzato, con le formule della geometria della sfera, per calcolare anche la superficie e il volume del nostro pianeta. La superficie "**S**" vale**:**

$$\mathbf{S = 4 \cdot \pi \cdot R^2 = 4 \cdot 3{,}14 \cdot 6.371^2 = 5{,}10 \cdot 10^8\ km^2}$$

cioè oltre 500 milioni di chilometri quadrati dei quali 7/10 occupati dai mari e dagli oceani. Il volume "**V**" vale**:**

$$\mathbf{V = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot R^3 = \frac{4}{3} \cdot 6.371^3 = 1{,}08 \cdot 10^{12}\ km^3}$$

cioè oltre 1.000 miliardi di chilometri cubi (**fig. 2.9**) corrispondente a circa 10^{21} m^3 oppure a 10^{24} dm^3. In **fig. 2.9** è riportato anche il valore approssimativo della massa della Terra, che risulta essere pari a circa $6{\cdot}10^{24}$ kg, cioè 6 milioni di miliardi di miliardi di chilogrammi. Per determinare questo valore si sono utilizzati ragionamenti di tipo fisico che rimandiamo alle **schede 2.3**, **2.4** e **2.5**.

2.6 - Densità della Terra

Conosciamo il volume **V** ($1{,}08{\cdot}10^{12}$ km^3 ≈ $1{,}1{\cdot}10^{24}$ dm^3) e la massa **M** (≈ $6{\cdot}10^{24}$ kg) della Terra, ma abbiamo ottenuto numeri straordinariamente grandi e di difficile interpretazione. Da essi è possibile ricavare la **densità media della Terra**. Occorre prima sgombrare il campo da possibili equivoci sul significato fisico della densità. Infatti spesso si sente dire, per esempio, che l'olio è più denso dell'acqua perché la materia che lo compone lo rende meno fluido; l'acqua invece adatta più rapidamente la propria forma a un qualsiasi contenitore. In realtà il modo più giusto per indicare questa differenza fra i due liquidi è che l'olio è più "viscoso" dell'acqua ed il primo invece è meno denso perché galleggia sulla seconda se presenti nello stesso recipiente. La densità (**d**), che quindi non va confusa con la viscosità, esprime la massa di un volume unitario. Essa può essere calcolata con il rapporto fra il valore della massa [kg] e il volume [dm^3] di un corpo. Nel caso della Terra avremo**:**

$$\mathbf{d = \frac{M}{V} = \frac{6 \cdot 10^{24}}{1{,}1 \cdot 10^{24}} = 5{,}5\ kg/dm^3}$$

Ciò significa che un cubo di lato 10 cm della materia che compone la Terra ha una massa media di 5,5 kg. L'acqua, ha densità molto inferiore, pari a 1 kg/dm^3 se distillata, leggermente superiore se naturale. L'olio da cucina è meno denso (intorno a 0,95 kg/dm^3). I geologi sanno però che la densità media dei materiali della superficie della Terra (compresi quelli rinvenuti in miniere anche molto profonde) è molto più bassa**: ~ 2,8 kg/dm^3**.

Si può pensare che nel cuore della Terra la pressione esercitata sui materiali sia molto grande, ma non è ragionevole pensare a rocce, con composizione simile a quelle superficiali, talmente compresse da risultare con una densità pari al doppio. Si deve allora supporre che i materiali che si trovano in profondità siano diversi. Per esempio il nucleo della Terra potrebbe essere di ferro (~ 8 kg/dm^3) dato che è l'elemento, fra quelli "pesanti", più diffuso in superficie, ma potrebbe essere anche di un altro materiale come piombo, oro, mercurio, anche se più rari. Inoltre i materiali che costituiscono l'interno della Terra in quale condizioni si trovano**?** Dipende dalla pressione e dalla temperatura e quindi potrebbero trovarsi nello stato liquido o in quello solido o in entrambi.

I valori diversi delle densità medie della superficie e della Terra intera portano a concludere che la densità dei materiali sia maggiore in profondità. Questa considerazione ci porta un'altra domanda**:** *in che modo la densità cresce con la profondità* (**fig. 2.11**)**?** La risposta a tale quesito costituisce uno degli obiettivi più importanti delle Scienze della Terra.

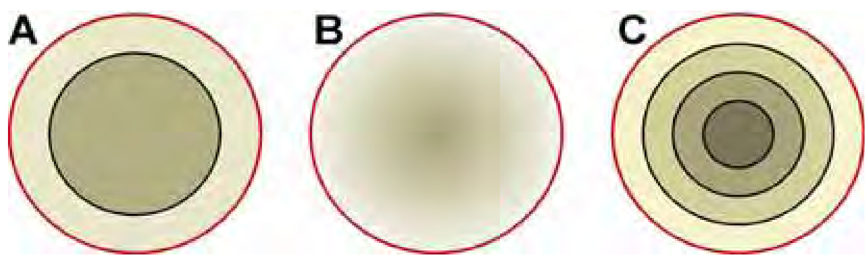


Fig. 2.11 - Conoscendo solo la densità media della Terra si possono ipotizzare diverse distribuzioni con la profondità**:** uno strato di materiali più "leggeri" che racchiude un nucleo di materiali più "pesanti" (**A**), uniforme crescita della densità con la profondità (**B**), una serie di strati ciascuno più denso del sovrastante (**C**).

SCHEDA 2.1- Che ora è?

La sfericità della Terra e i suoi moti di rotazione e di rivoluzione sono all'origine dell'alternarsi del dì e della notte che, a seconda delle stagioni e delle latitudini, possono avere durate molto diverse (**tab. 2.1**). A seconda della longitudine, inoltre, si pone il problema di stabilire **che ora è**. Soltanto le località poste sullo stesso meridiano hanno la stessa ora locale. Sarebbe tuttavia molto scomodo se tutti gli infiniti punti sulla Terra dovessero avere un'ora locale, magari diversa per pochi minuti da quella di punti distanti pochi kilometri. Per ovviare a questo problema, una convenzione internazionale stabilì, nel 1884, di dividere la superficie terrestre in 24 **fusi orari** (**fig. 2.12**). Essi sono zone comprese fra due meridiani distanti 15° di longitudine. Tutto il territorio presente nel fuso ha, per convenzione, l'ora del meridiano che divide in due metà il fuso stesso. L'Italia, che aderì alla convenzione nel 1893, appartiene al fuso orario dell'Europa centrale (detto anche fuso "**1**" o fuso "**A**"), il cui meridiano centrale passa per l'Etna. In tutte le nazioni che si trovano in questo fuso, è mezzogiorno quando sul meridiano fondamentale sono le ore 11.

Il tempo così stabilito (detto **tempo civile**) è di tipo convenzionale, ma è molto vicino a quello astronomico ed è quello che leggiamo sui nostri orologi. L'**ora legale** (*ora estiva*) è quella del fuso orario adiacente a Est. Essa viene utilizzata per sfruttare maggiormente il periodo di luce in estate. Il tempo universale (valido su tutta la Terra ed indicato con la sigla **GMT**) è l'ora del **fuso 0**, il cui meridiano centrale è quello fondamentale; esso viene detto **Tempo medio di Greenwich**.

La **tab. 2.2** riporta l'ora locale di alcune città nel mondo nello stesso momento in cui a Roma è mezzanotte tra i giorni mercoledì e giovedì. Poiché ogni 15° si salta di un'ora, dopo aver compiuto un giro della Terra (360°) avremo perso o guadagnato 24 ore (360°/15°) e cioè un giorno. Il meridiano di longitudine 180°, quello esattamente opposto al meridiano fondamentale, è la **linea del cambio di data**. Una nave o un aereo che lo attraversa da Ovest verso Est anticipa la data di un giorno; viceversa lo posticipa di un giorno.

Latitudine	21 giugno		21 marzo e 21 settembre	21 dicembre	
	solstizio d'estate		**equinozi**	**solstizio d'inverno**	
	ore	minuti	ore	ore	minuti
90 gradi Latitudine Nord	**24**	**-**	**12**	**0**	**-**
80 gradi Latitudine Nord	**24**	**-**	**12**	**0**	**-**
70 gradi Latitudine Nord	**24**	**-**	**12**	**0**	**-**
60 gradi Latitudine Nord	**18**	**27**	**12**	**5**	**33**
50 gradi Latitudine Nord	**16**	**18**	**12**	**9**	**42**
40 gradi Latitudine Nord	**14**	**52**	**12**	**10**	**8**
30 gradi Latitudine Nord	**13**	**56**	**12**	**10**	**4**
20 gradi Latitudine Nord	**13**	**12**	**12**	**11**	**48**
10 gradi Latitudine Nord	**12**	**35**	**12**	**12**	**25**
0 gradi Equatore	**12**	**-**	**12**	**12**	**-**
10 gradi Latitudine Sud	**11**	**25**	**12**	**13**	**35**
20 gradi Latitudine Sud	**10**	**48**	**12**	**13**	**12**
30 gradi Latitudine Sud	**10**	**4**	**12**	**13**	**56**
40 gradi Latitudine Sud	**9**	**8**	**12**	**14**	**52**
50 gradi Latitudine Sud	**7**	**42**	**12**	**16**	**18**
60 gradi Latitudine Sud	**5**	**33**	**12**	**18**	**27**
70 gradi Latitudine Sud	**0**	**-**	**12**	**24**	**-**
80 gradi Latitudine Sud	**0**	**-**	**12**	**24**	**-**
90 gradi Latitudine Sud	**0**	**-**	**12**	**24**	**-**

Tab. 2.1 - Durata del dì (ore di luce) in funzione della latitudine negli equinozi e nei solstizi.

Località	ora civile	giorno	Località	ora civile	giorno
Roma	**24.00**	**mercoledì**	Honolulu	**13.00**	**mercoledì**
Cairo	**01.00**	**giovedì**	San Francisco	**15.00**	**mercoledì**
Tokyo	**08.00**	**giovedì**	New York	**18.00**	**mercoledì**
Sydney	**09.00**	**giovedì**	Rio de Janeiro	**20.00**	**mercoledì**
Wellington	**11.00**	**giovedì**	Londra	**23.00**	**mercoledì**

Tab. 2.2 - Ore locali in alcune città riferite alla mezzanotte di Roma.

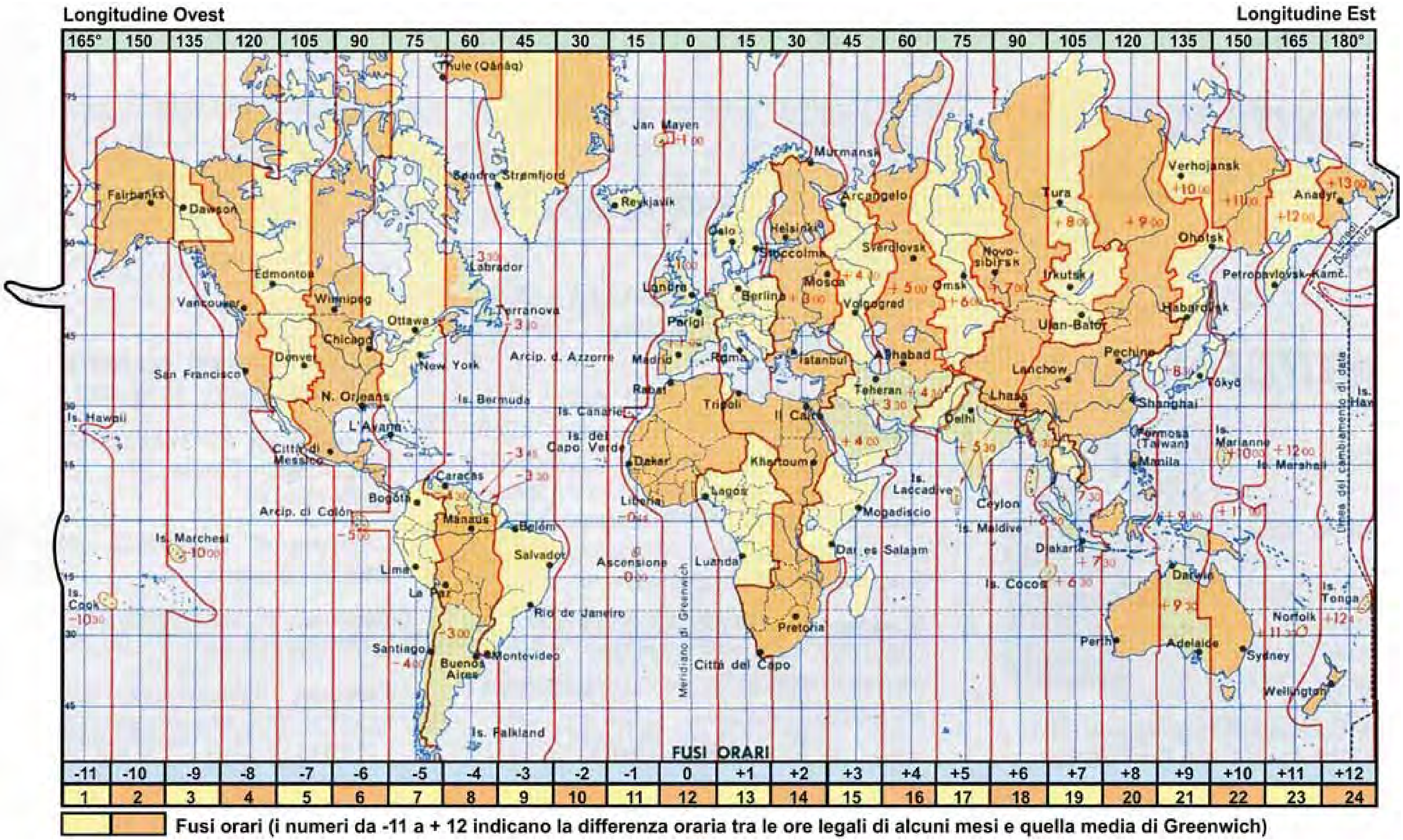


Fig. 2.12 - Mappamondo con rappresentazione dei **fusi orari**, ciascuno dei quali di ampiezza pari a 15°. L'italia è compresa nel fuso numero 1.

SCHEDA 2.2 - Un po' di geometria con Eratostene

I greci scoprirono che la Terra è rotonda e ne calcolarono il raggio con una certa precisione. Vicino a Syene (l'attuale Assuan, in Egitto, in corrispondenza del tropico del Cancro), a mezzogiorno del solstizio d'estate (il 21 giugno, inizio dell'estate astronomica), un'asta perpendicolare al terreno non origina ombra perché il Sole è perfettamente verticale (allo zenit). Alla stessa ora dello stesso giorno ad Alessandria, a circa 720 km (720.000 m) verso Nord, un'altra asta (lunga 1 metro) origina una piccola ombra (lunga 11,4 cm = 0,114 m) perché il Sole si trova spostato leggermente a Sud rispetto allo zenit (**fig. 2.13**). Per la grande distanza del Sole i suoi raggi si possono considerare paralleli e quindi diversamente inclinati rispetto alla superficie della Terra in conseguenza della sua rotondità. Indichiamo con "**l**" la lunghezza dell'asta usata ad Alessandria, con "**s**" la lunghezza dell'ombra, con "**d**" la distanza fra le due città e con "**R**" il raggio della Terra. È possibile scrivere la seguente proporzione**:**

$$\frac{\mathbf{s}}{\mathbf{l}} = \frac{\mathbf{d}}{\mathbf{R}} \qquad \text{da cui:} \qquad \mathbf{R} = \mathbf{d} \cdot \frac{\mathbf{l}}{\mathbf{s}} = \mathbf{720.000} \cdot \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{0{,}114}} = \mathbf{6.315.000m} = \mathbf{6.315\ km}$$

un valore molto vicino al raggio medio terrestre dell'elissoide internazionale di 6.371 km quale utilizziamo oggi.

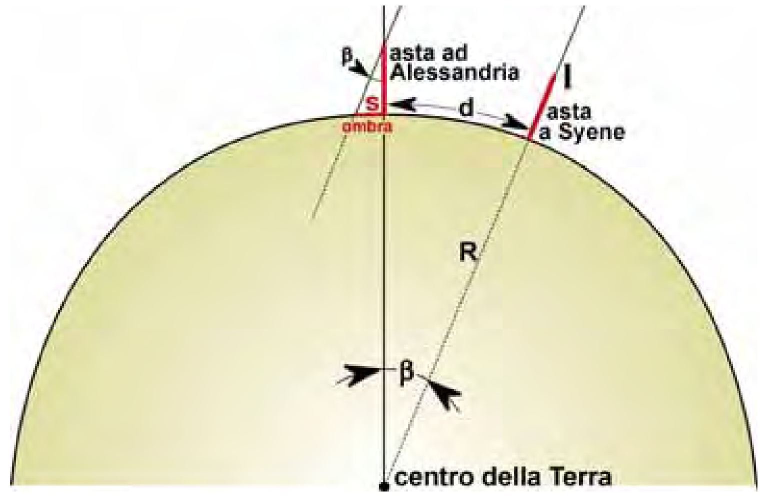


Fig. 2.13 - Con semplici regole della geometria piana, ERATOSTENE riuscì a determinare, con buona approssimazione, il raggio "**R**" della Terra, conoscendo**:**

- la distanza "**d**" tra due aste piantate perpendicolarmente al terreno presso Alessandria e Syene (in Egitto);
- la lunghezza "**l**" dell'asta presso Alessandria;
- la lunghezza "**s**" dell'ombra proiettata dall'asta presso Alessandria alle ore 12 del 21 giugno (allo zenit presso Syene nel solstizio d'estate).

Con una semplice proporzione ed effettuando i calcoli, si ottiene R = 6.315 km, valore molto vicino a quello del raggio medio oggi conosciuto.

SCHEDA 2.3 - Un po' di fisica: massa e peso

Che cosa è il **peso**? L'idea più semplice è lo "sforzo per sollevare un oggetto", oppure la forza con cui l'oggetto è "attratto" verso la superficie della Terra; l'oggetto "cade" (si muove verso la superficie terrestre) perché sottoposto all'azione del suo peso. La misura del peso può essere effettuata per mezzo di un dinamometro o di una bilancia e l'unità di misura fondamentale è il **Newton** (**N**). Il peso di un oggetto può cambiare da luogo a luogo; per esempio ai poli è maggiore dello 0,5 % rispetto all'equatore. Esso diminuisce leggermente salendo di quota e può essere addirittura assente a bordo di un veicolo spaziale in orbita. Sulla Luna un sasso pesa circa sei volte di meno che sulla Terra (sul pianeta Giove peserebbe molto di più). Quindi *il peso è una caratteristica fisica che non dipende solo dall'oggetto (dimensioni e materiale) ma anche dal posto in cui si trova*.

La **massa** è una caratteristica fisica che dipende unicamente dalle dimensioni e dal tipo di materiale di un certo oggetto. Per esempio un cubo di ferro di lato 1 cm rimane tale (sempre di ferro e sempre con le stesse dimensioni) in un qualunque punto della superficie terrestre o dell'Universo o in una navicella spaziale. La massa di un oggetto non cambia, ma può cambiare il suo peso. La massa è l'espressione della composizione chimica e del volume (quantità) di un oggetto, mentre il peso rappresenta la forza con la quale la massa viene attirata verso il basso. È molto importante non confondere massa e peso; un mattone (la sua massa) rimane tale sia sulla Terra che sulla Luna, ma cambia il suo peso. Eppure la confusione è molto facile perché spesso, nel linguaggio comune, i due termini vengono usati indifferentemente l'uno per l'altro.

Se è chiara la differenza tra massa e peso, altrettanto chiaro dovrebbe essere che un oggetto che abbia una certa massa possiede anche un peso perché è vicino alla superficie della Terra, altrimenti "non potrebbe pesare". Dovrebbe essere quindi comprensibile che non è possibile determinare il peso della Terra; essa per possedere un peso dovrebbe essere "appoggiata" su un'altra Terra. Cercheremo invece di determinarne la massa. Qual è il legame tra massa e peso**?** Esiste una funzione fra queste due grandezze fisiche**?** Se prendiamo in considerazione un litro d'acqua, esso pesa un 9,81 N, un volume triplo di acqua pesa tre volte di più, un volume pari alla metà pesa 4,91 N. Variando il volume d'acqua cambia la massa che assume, quindi, pesi diversi. La massa può essere modificata anche conservando il volume dell'oggetto da pesare, ma cambiando il materiale. Un decimetro cubo di legno ha massa minore (e peserà meno) dello stesso volume (corrispondente a un litro) di acqua e molto di meno di un decimetro cubo di marmo. Aumentando la massa, aumenta il peso e viceversa; *peso* "**P**" *e massa* "**m**" *sono due grandezze fisiche direttamente proporzionali, pertanto il loro rapporto non cambia* (è una costante "**k**")**:**

$$\frac{\mathbf{P}}{\mathbf{m}} = \mathbf{k}$$

Che cosa rappresenta "**k**" oltre che la semplice affermazione "*rapporto costante di proporzionalità diretta tra peso e massa*"**?** Due oggetti con masse diverse e quindi con differenti pesi, precipitano al suolo impiegando lo stesso tempo se lasciati cadere da uguale altezza. Anche un pezzo di piombo e una piuma, se non fosse per la presenza dell'aria che frena la caduta della seconda, giungerebbero al suolo con la stessa velocità (è quanto si potrebbe sperimentare sulla Luna che non possiede un'atmosfera). Un oggetto è tanto più difficile da spostare quanto maggiore è la sua massa. Il peso, che è la forza che "sposta" gli oggetti verso il basso (facendoli precipitare), è proporzionale alla massa e quindi tutti gli oggetti precipitano al suolo con la stessa accelerazione, detta appunto **accelerazione gravitazionale terrestre** (**g**); vale **9,81 m/sec**^{2} e rappresenta la costante di proporzionalità diretta fra peso e massa**:**

$$\frac{\mathbf{P}}{\mathbf{m}} = \mathbf{g} = \mathbf{9{,}81\ m/s^2}$$ (che si può anche esprimere come **P = m·g**)

Il che vuol dire che un oggetto (per esempio una pallina di piombo), indipendentemente dalla massa, dopo un secondo che precipita, viaggia alla velocità di quasi 10 m/s, dopo due secondi viaggia alla velocità di quasi 20 m/s e cosi via; dopo 10 secondi (circa 500 metri di caduta libera) viaggia alla velocità di 98,1 m/s (oltre 350 chilometri all'ora); lo straordinario è rappresentato dal fatto che anche una piuma, in assenza di aria, si comporterebbe nello stesso modo.

SCHEDA 2.4 - Perché gli oggetti cadono?

Un bambino di pochi mesi è istintivamente uno scienziato, tutto lo incuriosisce. Per esempio gli oggetti senza un sostegno cadono. Egli allora fa cadere tutto ciò che si trova a portata di mano "studiando" gli oggetti che precipitano, ma ogni volta senza trovare la risposta al quesito**: perché gli oggetti cadono?** Col passare del tempo il bambino finisce con l'accettare il fenomeno della "*caduta dei gravi*" come se la tendenza di tutti i corpi ad "andare verso il basso", a "cadere dall'alto", fosse cosa "normale". In effetti l'abitudine al fenomeno della caduta dei gravi è ormai una semplificazione concettuale acquisita. Talvolta possono ancora sorgere dubbi su come gli uomini vicino al Polo Sud rimangano attaccati con i piedi al suolo senza che il sangue vada alla testa; lo stesso dubbio può venire agli abitanti dell'emisfero australe rispetto a quelli dell'emisfero Nord. Sappiamo anche, come verificato per esperienza diretta degli astronauti, che i corpi cadono con una accelerazione minore sulla Luna e che gli stessi non hanno peso su una navicella spaziale molto distante sia dalla Terra sia dalla Luna, ma che potrebbero pesare molto di più sulla superficie del grande pianeta Giove. Sembra quindi che *il peso di un oggetto sia una condizione che compare quando esso è in vicinanza di un corpo celeste* (Terra, Luna, Giove,...). Generalizzando, come fece NEWTON, due corpi qualunque, aventi masse $\mathbf{m_1}$ ed $\mathbf{m_2}$, i cui centri si trovano alla distanza **d**, si attirano reciprocamente con una forza **F** nel modo indicato dalla seguente espressione**:**

$$\mathbf{F} = \mathbf{G} \cdot \frac{\mathbf{m_1} \cdot \mathbf{m_2}}{\mathbf{d^2}}$$

dove **G** è un valore numerico costante che Newton non riuscì a determinare. Dalla formula appena scritta si capisce che la forza di attrazione **F** aumenta al crescere delle due masse (perché si trovano al numeratore della frazione), mentre diminuisce al crescere della distanza **d** (al denominatore). Nella formula **d** è una grandezza elevata al quadrato; così, per esempio, se la distanza raddoppia la forza si riduce a un quarto, se la distanza si riduce a un terzo la forza diventa nove volte superiore. Se si pongono a brevissima distanza due pietre, dato che possiedono massa, dovrebbero attirarsi ed avvicinarsi reciprocamente; ma l'esperienza insegna che ciò non succede. Si potrebbe allora provare con due masse più grandi (come due macigni fra loro molto vicini), ma anche in questo caso non accadrebbe nulla. Il ragionamento di Newton è sbagliato**?**

CAVENDISH riuscì (nel 1798, a Londra), con un semplice esperimento, a determinare il valore della costante **G**, che risultò essere $6{,}67 \cdot 10^{-11}$ $m^3/s^2/kg$. Le unità che compaiono insieme al numero soddisfano l'esigenza di attribuire alla costante **G** dimensioni compatibili con quelle della precedente formula. È importante riflettere sulla grandezza del numero che è veramente molto piccolo; infatti è possibile spiegare alcune cose. Consideriamo due pietre da 0,1 kg ciascuna i cui centri siano distanti 5 cm (0,005 m); esse si attirano con una forza che può essere così calcolata**:**

$$\mathbf{F} = \mathbf{G} \cdot \frac{\mathbf{m_1} \cdot \mathbf{m_2}}{\mathbf{d^2}} = \mathbf{6{,}67 \cdot 10^{-11}} \cdot \frac{\mathbf{0{,}1 \cdot 0{,}1}}{\mathbf{(0{,}005)^2}} = \mathbf{0{,}00000027\ N}$$

cioè una forza di attrazione reciproca fra le due pietre di meno di tre decimi di milionesimi di Newton (N); si tratta di un valore chiaramente troppo basso per muovere le due masse uno verso l'altra.

La formula di Newton rappresenta l'espressione matematica del **principio di gravitazione universale**, perché è una delle leggi fondamentali fra quelle che regolano l'Universo. Le forze che tengono vincolate la Luna alla Terra, i pianeti al Sole, per esempio, sono dovute alle reciproche attrazioni fra corpi celesti che possiedono una massa. Il valore numerico di **G**, determinato da Cavendish, è una delle più importanti costanti fisiche (come la velocità della luce nel vuoto, la costante di Planck, la carica dell'elettrone,...) e viene anche indicata come **costante gravitazionale universale**, perché ritenuta valida per tutto l'Universo. Pertanto un corpo qualsiasi (una pietra, una palla, una piuma,...) e la Terra (se sufficientemente vicini) si attirano reciprocamente con una forza **F** secondo il principio di gravitazione universale; tale forza, data la grande massa del globo terrestre, è significativa; è il corpo ad avvicinarsi (cade) alla massa enormemente più grande della Terra che quindi rimane immobile. In sintesi quella forza rappresenta il peso del corpo.

Consideriamo ora due oggetti tra i più piccoli che conosciamo in natura e cioè gli atomi di idrogeno, quelli con massa minore tra tutti gli elementi conosciuti. Un atomo di idrogeno ha massa m = $1{,}67 \cdot 10^{-23}$g = $1{,}67 \cdot 10^{-26}$ kg. Poniamo ora due atomi di idrogeno alla distanza d = 1 km = 1.000 m. Si tratta di due masse che, per quanto piccole e per quanto distanti, si attraggono reciprocamente secondo il principio di gravitazione universale**:**

$$\mathbf{F = G \cdot \frac{m^2}{d^2} = 6{,}67 \cdot 10^{-11} \cdot \frac{(1{,}67 \cdot 10^{-26})^2}{1.000^2} \cong 1{,}9 \cdot 10^{-69}\,N}$$

Se la forza di attrazione sopra calcolata tra i due sassi è assolutamente irrisoria e quindi ampiamente insufficiente per muoverle "visibilmente" l'una verso l'altra, quella che abbiamo appena calcolato è infinitamente più piccola per far avvicinare due atomi di idrogeno lontani un kilometro, eppure esiste. Nel vuoto, senza ostacoli capaci di limitare il movimento dei due atomi, anche una forza così assurdamente piccola può far muovere tali particelle avvicinandole. Naturalmente l'accelerazione che viene inizialmente impressa ai due atomi è debolissima, ma basta avere pazienza; basta saper aspettare milioni di anni per osservare un effetto visibile e vedere quindi le due particelle effettivamente muoversi per venirsi incontro e soprattutto, man mano che passa il tempo, con velocità via via crescenti. Ora immaginiamo miliardi di miliardi di miliardi,… di atomi di idrogeno formanti una sorta di nube molto rarefatta nel vuoto spaziale che, proprio in quanto vuoto, costituisce la situazione migliore per il moto assolutamente privo di ostacoli. Ciascuna di quelle particelle esercita un'azione gravitativa nei confronti di quelle che stanno intorno e tutte tendono quindi ad avvicinarsi reciprocamente. Con il passare di centinaia di milioni di anni quella nube si contrae e le particelle che la compongono si avvicinano tra loro con velocità crescenti (collasso gravitazionale). Ma se quegli atomi di idrogeno si muovono con maggiore velocità, significa che aumenta la loro energia cinetica. Quindi aumenta l'energia cinetica complessiva dell'insieme di tutte le particelle che compongono la nube ma ciò, secondo la teoria cinetica della materia, significa anche un aumento dell'energia termica della nube**:** la contrazione comporta un aumento della temperatura che, come accade durante il processo di formazione di una stella, può arrivare fino a centinaia di migliaia di gradi, fino a valori di parecchi milioni, determinando così le condizioni per innescare i processi di fusione nucleare e quindi a liberare immani quantità di energia da rendere luminosa la stella stessa.

SCHEDA 2.5 - Esempi di calcoli con le masse

Per quanto fin qui espresso si può affermare che il peso **P** di un corpo dipende dalla sua massa **m** secondo la relazione**:**

$$\mathbf{P = m \cdot g}$$

La forza peso **P** di quella massa **m** è dovuta all'attrazione reciproca con la massa della Terra $\mathbf{M_T}$ secondo il principio di gravitazione universale. Dato che il corpo si trova in prossimità della superficie terrestre, la distanza fra i centri delle due masse coincide praticamente con il raggio terrestre $\mathbf{R_T}$. Pertanto possiamo scrivere**:**

$$\mathbf{P = G \cdot \frac{M_T \cdot m}{R_T^2}}$$

Le due espressioni rappresentano la stessa quantità **P**; pertanto possono essere uguagliate nel seguente modo**:**

$$\mathbf{G = \frac{M_T \cdot m}{R_T^2} = m \cdot g}$$

dove, semplificando il termine comune **m**, e risolvendo secondo **M** (e sostituendo i termini noti con utilizzo delle unità di misura fondamentali: metro, secondo, kilogrammo), si ricava la **massa della Terra:**

$$\mathbf{M_T = \frac{R_T^2 \cdot g}{G} = \frac{(6.371.000)^2 \cdot 9{,}81}{6{,}67 \cdot 10^{-11}} \cong 6 \cdot 10^{24}\,kg}$$

Quanto vale la forza di attrazione tra Sole e Terra**?** Anche in questo caso si può ricorrere al principio di gravitazione universale sapendo che la massa della Terra è pari a quella che abbiamo sopra calcolato $M_T \cong 6 \cdot 10^{24}$ kg, quella del Sole vale $M_S \cong 2 \cdot 10^{30}$ kg (oltre 330.000 volte quella del nostro pianeta) e che la distanza tra i due astri vale un'unità astronomica, pari a $R_{S\text{-}T} \cong$ 150.000.000 km $\cong 1{,}5 \cdot 10^{11}$ m. Pertanto la forza di attrazione Sole-Terra $\mathbf{F_{S\text{-}T}}$ vale:

$$\mathbf{F_{S-T} = G \cdot \frac{M_S \cdot M_T}{R_{S-T}^2} = 6{,}67 \cdot 10^{-11} \cdot \frac{(2 \cdot 10^{30}) \cdot (6 \cdot 10^{24})}{(1{,}5 \cdot 10^{11})^2} \cong 3{,}6 \cdot 10^{22}\,N}$$

Analogamente è possibile calcolare la forza di attrazione tra Terra e Luna ($\mathbf{F_{T\text{-}L}}$), sapendo che la massa della luna è $M_L = 7{,}4 \cdot 10^{22}$ kg e che la distanza media tra i due astri vale $R_{T\text{-}L}$ = 384.400 km $\cong 3{,}84 \cdot 10^6$ m**:**

$$\mathbf{F_{T-L} = G \cdot \frac{M_T \cdot M_L}{R_{T-L}^2} = 6{,}67 \cdot 10^{-11} \cdot \frac{(6 \cdot 10^{24}) \cdot (7{,}4 \cdot 10^{22})}{(3{,}84 \cdot 10^6)^2} \cong 2{,}0 \cdot 10^{24}\,N}$$

Risulta quindi che la forza di attrazione media che la Luna esercita sul nostra pianeta è circa 55 volte più grande di quella esercitata dal Sole, anche se la massa della stella è quasi 30 milioni di volte più grande di quella del nostro satellite. Ma nella formula della gravitazione universale conta anche e soprattutto la distanza (elevata al quadrato) tra i due corpi e quella tra Terra e Luna è quasi 40.000 volte più piccola rispetto alla distanza Terra - Sole. Ciò spiega quantitativamente il motivo per cui la Luna condiziona le maree in modo più evidente rispetto alla massa enormemente superiore del Sole.

Inoltre l'influenza gravitazionale della Stella sul nostro pianeta è pressoché costante; infatti l'orbita terrestre è una ellissi molto poco eccentrica, cioè "quasi" circolare, con raggi massimo ($152{,}1 \cdot 10^6$ km) e minimo ($149{,}6 \cdot 10^6$ km) poco diversi. Invece l'orbita della Luna intorno alla Terra è abbastanza eccentrica, con differenza evidente tra i due raggi massimo (perigeo - 405.506 km) e minimo (apogeo - 363.300 km). Eseguendo il quadrato del rapporto tra i due valori si ottiene il valore 1,06; ciò significa che in posizione di apogeo la Luna esercita una attrazione gravitazionale sulle acque dei mari e degli oceani superiore di circa il 6 % rispetto alla posizione di apogeo.