

Maree - le azioni astronomiche

Con il termine *marea* si identificano quei fenomeni periodici regolari che interessano le acque e l'atmosfera (in effetti anche le rocce) dovuti all'attrazione gravitazionale da parte dei corpi celesti, in particolare della Luna e del Sole.

Le maree classiche, quelle che interessano la superficie del mare, note fin dall'antichità, sono evidenziate per lo più da due alzamenti e due abbassamenti del livello dell'acqua in circa 24 ore. Sono le cosiddette maree *semidiurne*, le più diffuse.

La marea, in inglese *tide*, in francese *marée*, si manifesta in una condizione di *alta marea* (*high water*) quando il livello della superficie marina raggiunge il massimo valore per poi diminuire fino ad un minimo livello corrispondente alla *bassa marea* (*low water*).

L'intervallo temporale compreso tra una bassa marea (BM) e la successiva alta marea (AM) è detto *flusso di marea* (*rise*) o semplicemente *flusso*, mentre l'intervallo tra un'alta e la successiva bassa marea è detto *riflusso* (*fall*). Il dislivello prende il nome di *ampiezza* (*amplitude*) o *escursione di marea*. Il valore medio dei livelli marini osservati durante un lungo periodo di tempo, in una località, è il *livello medio*.

Flusso e riflusso di acqua nella località in cui avvengono danno luogo a *correnti di marea* (*tidal streams*) ben distinte da altri tipi di correnti (*currents*).

Poco prima e poco dopo il raggiungimento della massima e minima escursione di marea le variazioni di livello sono più lente, una condizione che prende il nome di *stanca di marea* (*stand*), termine indicativo di una diminuzione della corrente in tali momenti.

Per una comprensione generale del fenomeno, didatticamente si è soliti riferirsi a quella che è detta *teoria statica* delle maree, illustrata più avanti in forma semplificata evitando quanto possibile l'uso di passaggi matematici.

Su tutti i corpi della Terra agisce la forza gravitazionale terrestre e le forze gravitazionali del Sole e della Luna (possono trascurarsi le azioni di altri corpi celesti), ma è quest'ultima, per la ridotta distanza dalla Terra, a prevalere (con una forza che è più del doppio rispetto a quella del Sole) così che la periodicità delle maree rispecchia principalmente i ritmi dei moti lunari.

Le figure 1 e 2 illustrano, attraverso l'uso dei vettori forza, come si formano, sotto l'influenza della Luna, le maree e le relative correnti.

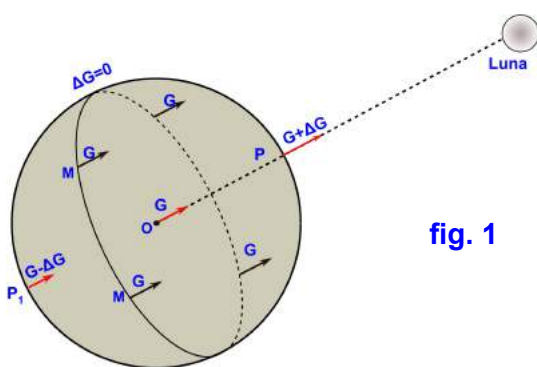


fig. 1

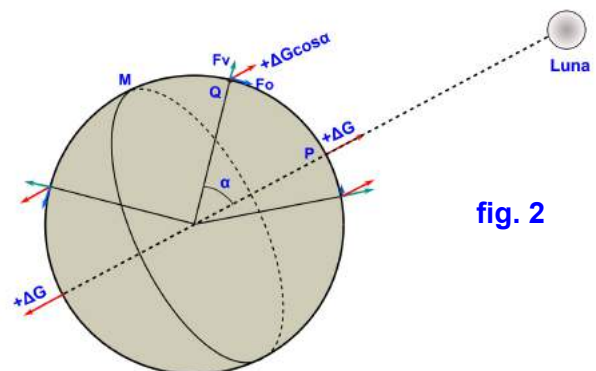


fig. 2

G : forza gravitazionale Terra-Luna su tutti i punti M del cerchio massimo (passante per il centro della Terra) aventi la stessa distanza dalla Luna

ΔG: variazione di G con la distanza (+ nel punto sublunare P; - nel punto antilunare P1)

- In un corpo in rotazione forza centripeta e centrifuga si fanno equilibrio.

- La forza centripeta è la forza di gravitazione universale (la forza, formulata da Newton, esercitata tra due corpi dotati di massa), in questo caso G tra Terra e Luna, agente al centro dei rispettivi corpi celesti; la forza centrifuga è dovuta al moto reciproco di rivoluzione tra i due corpi (fig. 3)

- Ne segue che le particelle d'acqua possono considerarsi soggette alla differenza ΔG tra la forza gravitazionale G , agente al centro della terra e la forza reale agente su ogni punto della superficie terrestre.

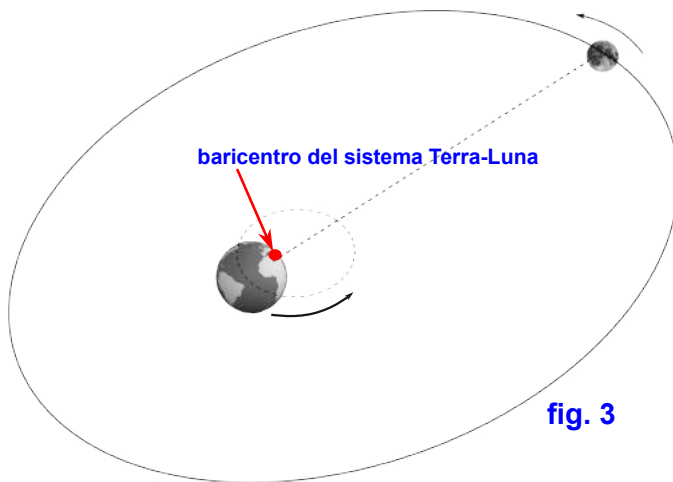


fig. 3

Nota: nelle fig. 1 e 2 la forza ΔG nel punto antilunare, essendo negativa, può essere rappresentata da un vettore positivo ma di verso opposto. Tale osservazione rappresenta un modo per spiegare la particolare forma delle acque con due alzamenti contrapposti.

Un altro modo è spiegabile con la fig. 3 e con quanto detto sulle forze centrifuga e centripeta. La Terra da una parte è sottoposta all'azione della Luna e dall'altra alla forza centrifuga per la sua rotazione intorno al baricentro del sistema Terra-Luna. Analogamente a quanto si osserva nello sport del lancio del martello

Dalla fig. 2 si comprende che qualunque massa della superficie terrestre può essere soggetta ad una forza, variabile tra ΔG (nel punto sublunare P) e zero (in M al cerchio massimo), dipendente dalla sua posizione (espressa da α in Q) rispetto alla congiungente Terra - Luna. Tale forza agente in ogni punto può scomporsi in una componente orizzontale ed una verticale (come in Q), quest'ultima molto piccola rispetto alla forza di gravità (in altre parole al peso). Paradossalmente sono gli scorrimenti orizzontali, dovuti alle componenti orizzontali delle forze, che causano la marea (moti verticali) e quindi a dare origine alle correnti di marea (moti orizzontali, la cui distribuzione è illustrata nella fig. 4).

A questo punto si può ipotizzare che le forze e quindi la superficie delle acque raggiungano una

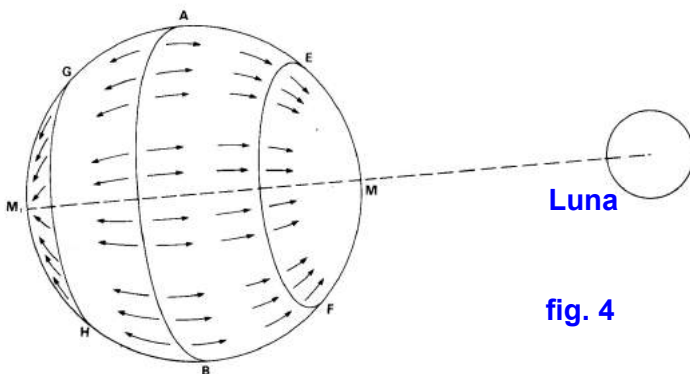


fig. 4

condizione di equilibrio in cui la massa d'acqua assume la forma di un ellissoide con l'asse maggiore nella direzione della Luna.

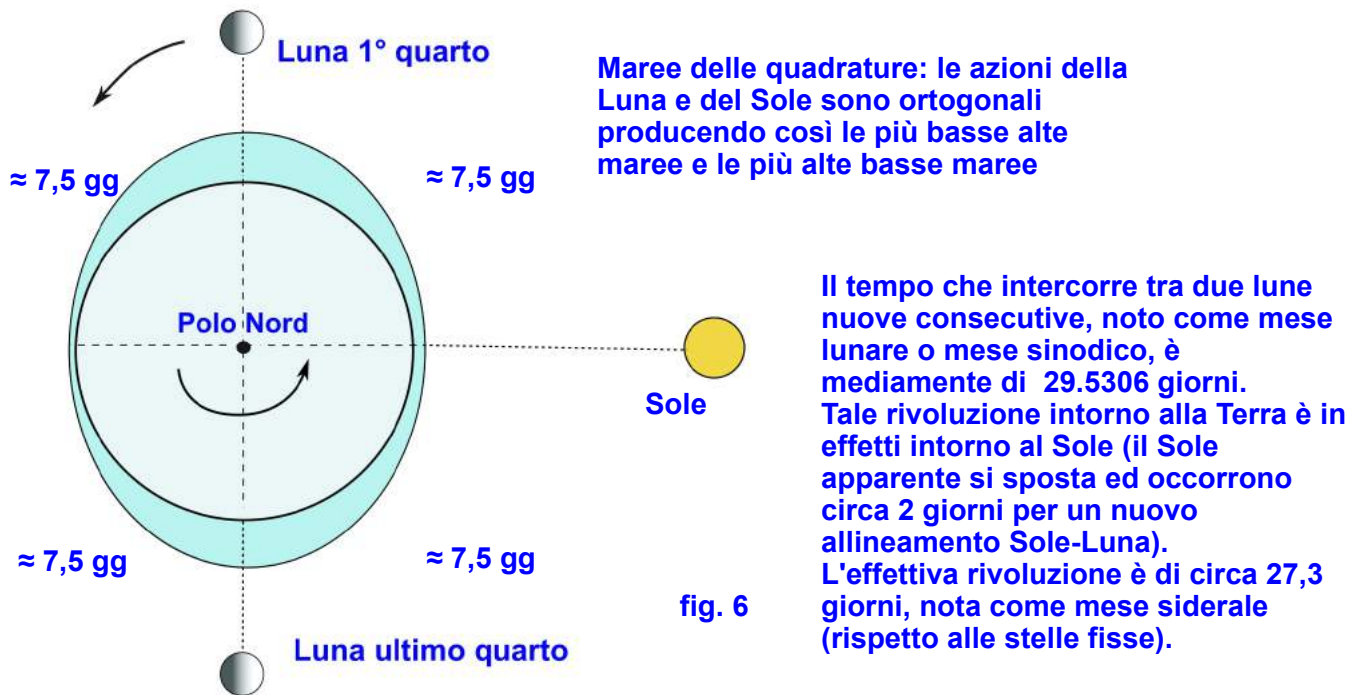
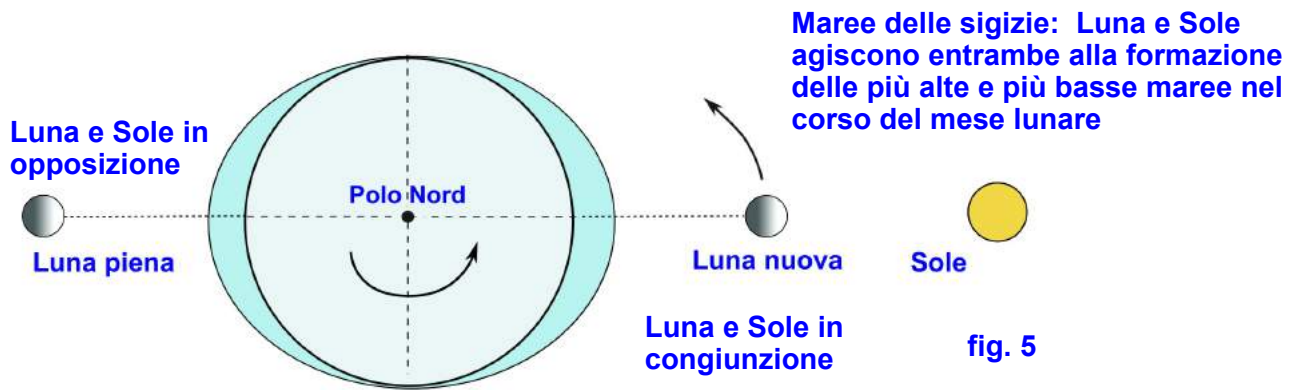
Poi la Luna cambia posizione e le acque si sposteranno verso una nuova condizione di equilibrio.

Poichè la Luna ritorna al meridiano del luogo dopo un giorno lunare, di circa 24h e 50m, si potranno osservare una bassa ed

un'alta marea in un intervallo di circa 12h 25m: al sorgere della Luna si avrebbe una bassa marea; un'alta marea al suo passaggio in meridiano (culminazione superiore); una seconda bassa marea al tramonto della Luna ed una seconda alta marea alla culminazione inferiore dell'astro.

In realtà, a causa della rotazione della Terra, l'alta marea non si verifica proprio quando la Luna è in meridiano, un ritardo che può raggiungere i due giorni in prossimità delle sigizie e delle quadrature. Tale sfasamento tra il fenomeno astronomico ed il fenomeno fisico è detto *età della marea*. Il valore orario da aggiungere all'ora del passaggio della Luna al meridiano di un dato luogo per ricavare l'ora dell'alta marea quando Luna e Sole si trovano in congiunzione o in opposizione (novilunio e plenilunio), è noto come *stabilimento* od *ora di porto*.

Quanto descritto caratterizza le cosiddette *maree semidiurne* con 2 AM e 2 BM, intervallate di 6h 12 $\frac{1}{2}$ m .



Nell'osservare le fig. 5 e 6, in cui la Terra è vista dal polo, si riesce a comprendere quando, nel corso di un mese sinodico, si verificano le condizioni più favorevoli alle maggiori e minori ampiezze di una marea semidiurna. Si tratta di quattro momenti ben definiti caratterizzati da:

- due *maree delle sigizie* (*Spring tides*), dove per *sigizie* si intendono i giorni della *Luna nuova* (*change*) e della *Luna piena* (*full*) in cui, nella maggioranza dei porti, si presentano, con un ritardo pari all'*età della marea*, i massimi dell'ampiezza (le più alte AM e le più basse BM);
- due *maree delle quadrature* (*Neap tides*), in cui le *quadrature* sono i giorni corrispondenti al primo e all'ultimo quarto della Luna (*quarter*), durante i quali si osservano, in dipendenza dell'età della marea, i minimi dell'ampiezza: le più basse AM e le più alte BM.

L'intervallo tra ciascuna delle 4 fasi è di circa 7 giorni e mezzo.

Dalle osservazioni si ricava che solitamente le maree sigiziali e di quadratura ritardano di circa 2-3 giorni (età della marea) rispetto alle relative fasi lunari; un ritardo dovuto alla rotazione della Terra, all'inerzia del corpo idrico associato all'attrito che incontra nello scorrimento sul fondo marino.

Sempre dalla teorica statica risulta che quando la Luna si trova tra le posizioni di luna nuova e primo quarto o tra luna piena e ultimo quarto (fig. 7) la marea lunisolare *anticipa* (*prime*) sulla Luna al meridiano; viceversa (fig. 8) quando il satellite è tra primo quarto e luna piena o tra ultimo quarto e luna nuova, la marea *ritarda* (*lag*) sulla Luna al meridiano.

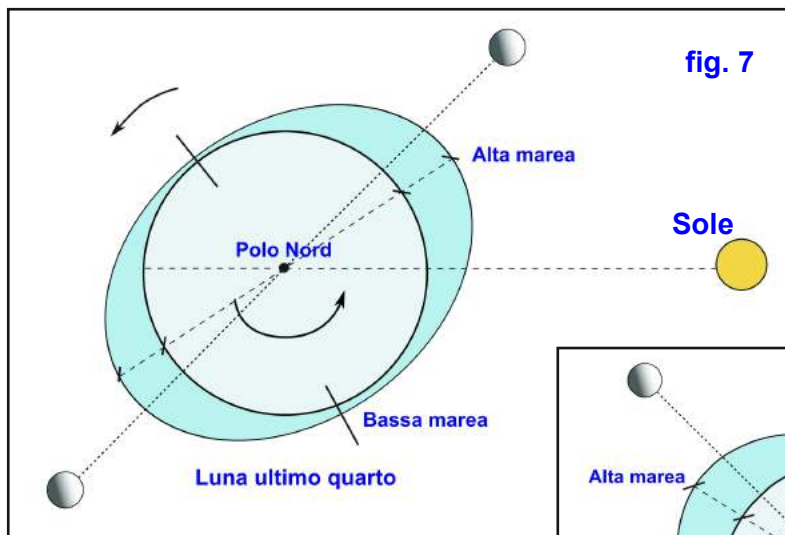


fig. 7

la marea anticipa la Luna

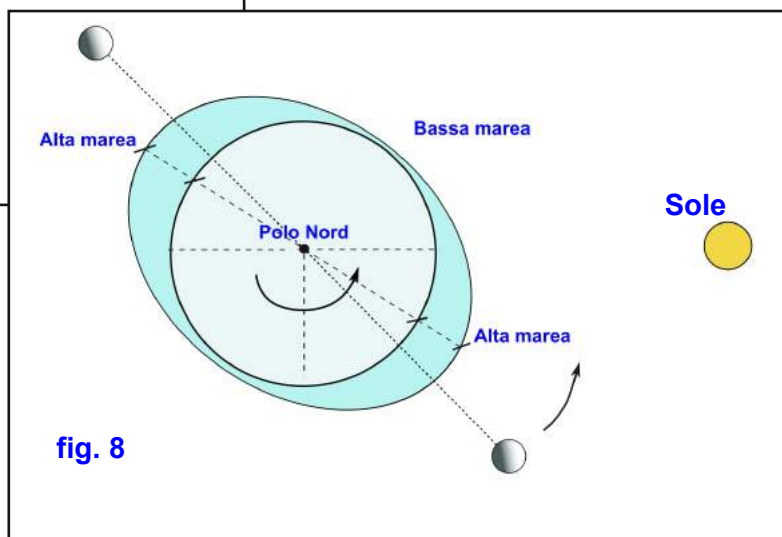


fig. 8

la marea ritarda sulla Luna

Questo è quanto si comprende osservando la Terra dal polo Nord.

Si può dimostrare, applicando la legge di gravitazione universale, che l'intensità della forza attrattiva di marea esercitata dalla Luna è inversamente proporzionale al cubo della distanza dei centri Terra-Luna ed è dipendente dalla distanza zenitale (distanza sferica di un astro dallo zenit del punto perturbato) della Luna, ovvero dalla declinazione (l'inclinazione di un astro rispetto all'equatore celeste e quindi a quello terrestre) della Luna.

Distanza e declinazione sono quindi una ulteriore influenza sulle maree.

Nel corso di un mese sidereo (27,3 giorni) la Luna quando è al perigeo (minor distanza dalla

Terra) esercita una maggiore azione. All'opposto, alla massima distanza dalla Terra (Luna all'apogeo) l'effetto di attrazione è minimo (circa il 15-20% dell'azione al perigeo).

Nella figura 9 è riportata la sfera celeste con l'eclittica, il percorso apparente del sole intorno alla Terra inclinato di $23^{\circ} 27'$ sull'equatore, mentre l'orbita lunare si discosta da questa di circa 5° .

La declinazione della Luna quindi varia tra circa $28^{\circ} N$ e $28^{\circ} S$, passando per 0° nel corso di un mese sidereo.

Per meglio comprendere gli effetti della declinazione occorre osservare l'allineamento Terra-Luna non più dal polo, ma nel piano nord-sud.

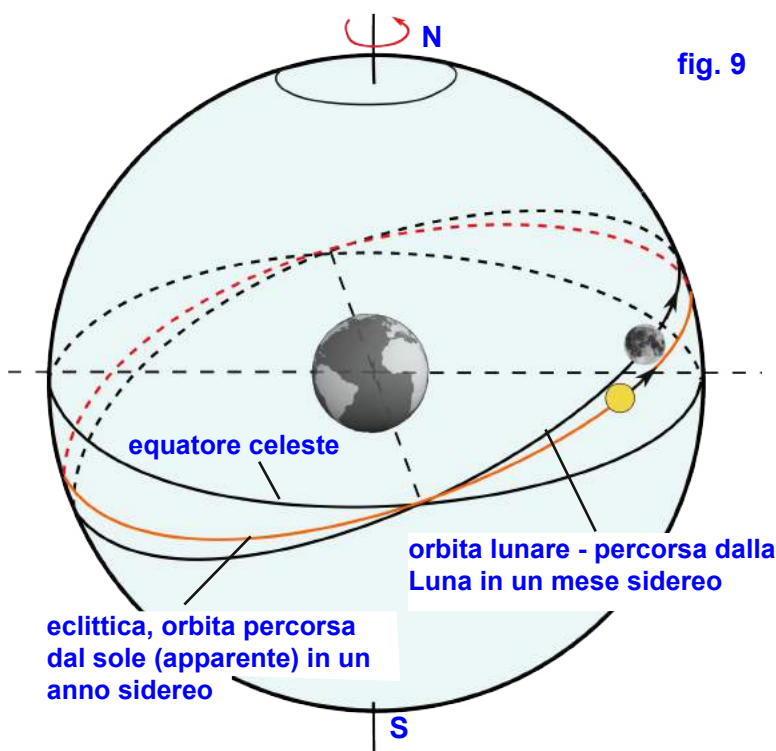
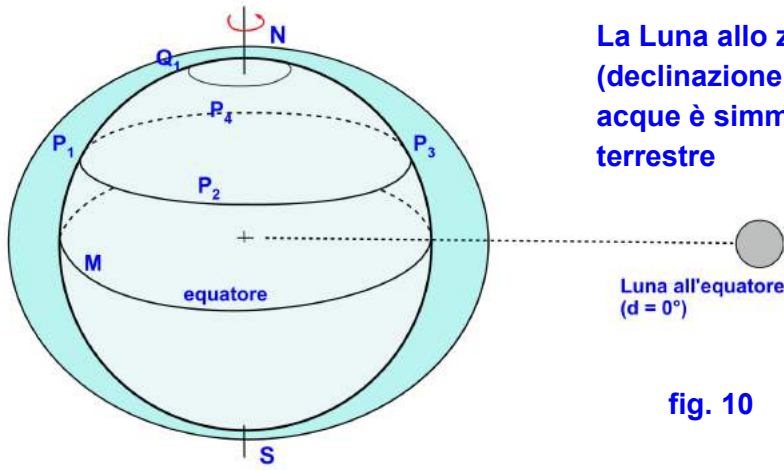


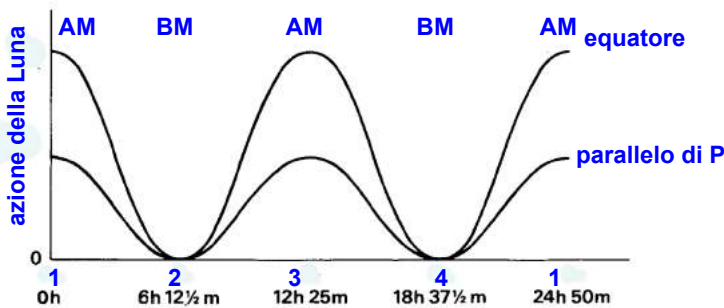
fig. 9



La Luna allo zenit dell'equatore (declinazione = 0°): l'ellissoide delle acque è simmetrico rispetto all'asse terrestre

fig. 10

Quando la declinazione è 0° (fig. 10), Luna all'equatore, la marea è semidiurna ovunque sulla Terra e tutti i punti posti sull'equatore hanno le massime escursioni di marea.



Andamento della forza di attrazione della Luna nelle maree semidiurne

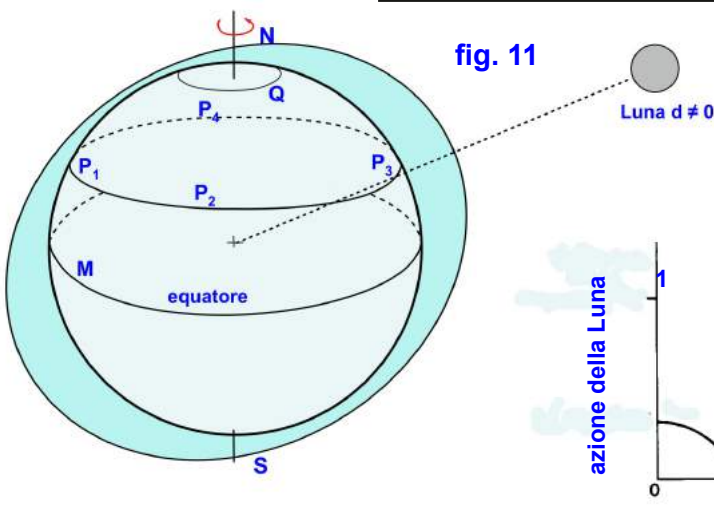
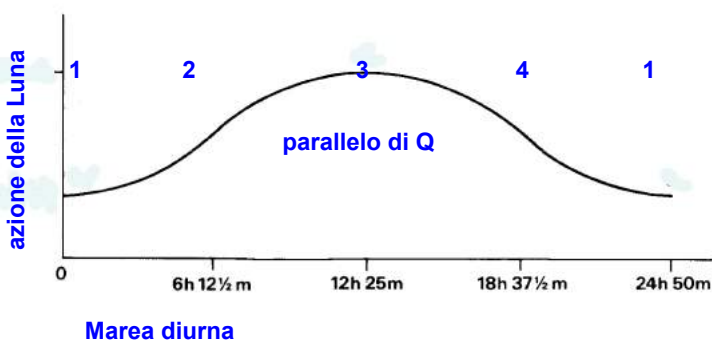
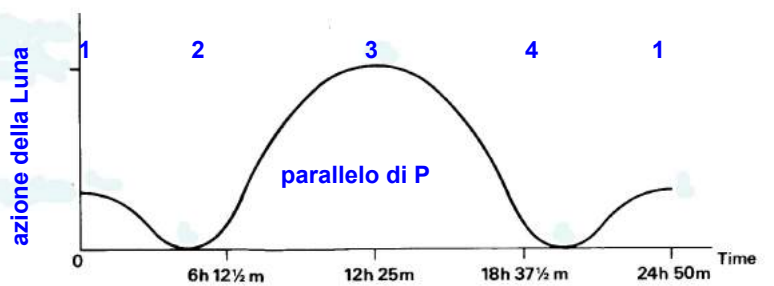


fig. 11

La Luna ha declinazione non nulla (è allo zenit del parallelo di P): l'ellissoide è ruotato



Marea diurna

Quando la declinazione d della Luna è diversa da 0° le maree sono per lo più ancora semidiurne, ma con disegualianza tra le AM e le BM sempre più accentuata salendo in latitudine fino ad aversi un solo episodio di marea giornaliera, la marea è diurna (latitudine a partire da $90^\circ - d$).

A completamento di questa breve presentazione della teoria statica, si rammenta che la minore azione del Sole ha una variazione annuale (365,2422 giorni solari) con un minimo quando l'astro è all'afelio (verso il 1° luglio) e un massimo al perielio (verso il 2 gennaio), il che si traduce in un'ulteriore effetto massimo a gennaio e minimo a luglio.

La teoria statica descritta sinteticamente ci permette di comprendere la genesi delle maree con i principali fenomeni quali i ritmi semidiurno e diurno nelle alternanze delle alte e basse maree, le variazioni delle ampiezze nel corso delle posizioni della Luna e del Sole, ecc., ma non spiega tutti i casi osservabili in vari luoghi del globo terrestre, come ad esempio le forti escursioni di marea. Pur derivata dalla legge gravitazionale di Newton, è un approccio infatti statico e pertanto insufficiente ad una previsione dei fenomeni reali, influenzati dalle configurazioni relative delle terre e dei mari, dalle condizioni meteorologiche ed altro ancora, che mutano fortemente da mare a mare e da sito a sito in uno stesso bacino.

L'assunzione di considerare ad ogni istante che la superficie delle acque si disponga in condizioni di equilibrio, rispetto al campo delle forze perturbatrici, è il principale motivo della discordanza fra teoria e osservazioni.

Il fenomeno è infatti di natura dinamica, basta pensare alle forze d'inerzia non trascurabili del corpo idrico, alle azioni dei fenomeni meteorologici, alle caratteristiche dei fondali ed altro ancora.

Il primo a compiere studi dinamici sull'argomento fu Pierre-Simon Laplace (1749 - 1827) che nel 1776 formulò le prime equazioni in cui compariva anche la rotazione della Terra (non era ancora stata definita la forza di Coriolis). I risultati ottenuti da Laplace, pur risultando un passo avanti nello studio delle maree non consentivano, per le sue intrinseche approssimazioni, la predizione delle maree.

Un cambiamento decisivo avvenne negli anni sessanta dell'800, quando venne applicata l'analisi armonica di Fourier ai movimenti delle maree ad opera del fisico scozzese William Thomson (1824 - 1907) che diverrà lord Kelvin nel 1892.

Il lavoro di Thomson fu ulteriormente sviluppato ed esteso da George Darwin (1845 - 1912), figlio del famoso biologo Charles, a cui si devono, tra l'altro, i simboli, ancora oggi utilizzati, delle armoniche di marea.