

Maggio-Giugno 2014

PAS - A056/C180

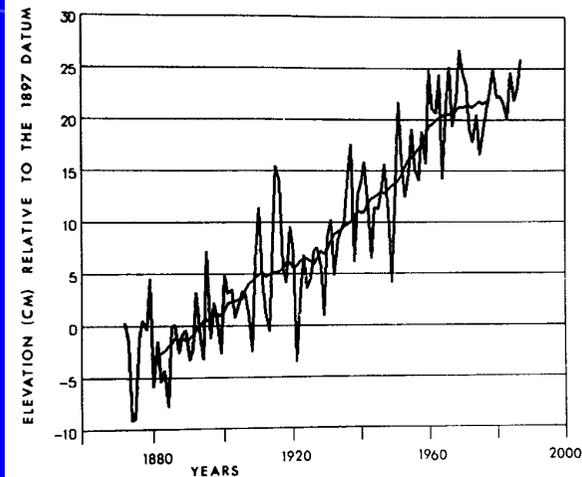
Oceanografia 4

**Il livello medio del mare;
Le maree astronomiche**

NOTA

Materiale didattico ad
uso esclusivo dei
frequentatori.

A cura del C.te Giorgio TROSSARELLI



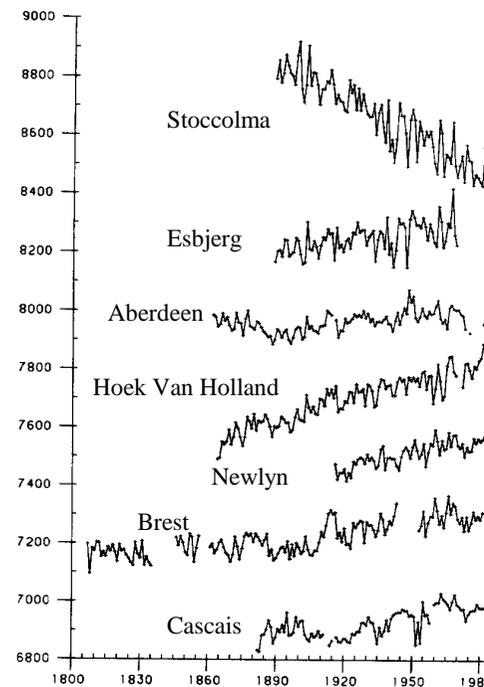
Andamento del livello medio marino

(Venezia dal 1880 al 1980)

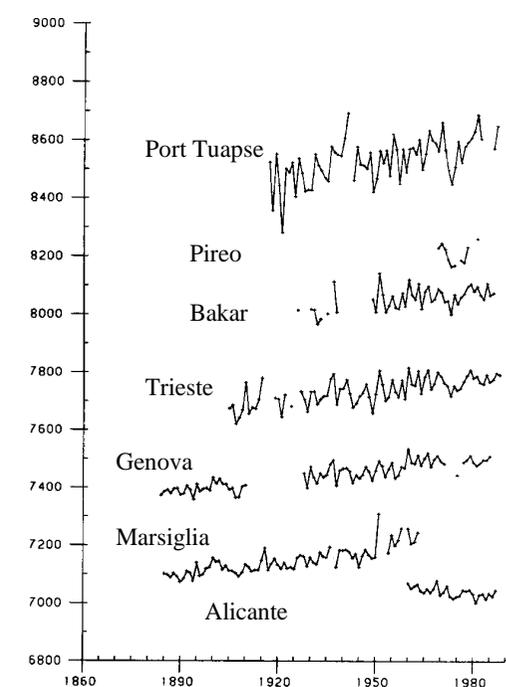
In tutte le località il livello del mare è in aumento ad eccezione di Stoccolma; in questo caso infatti si ha un apparente abbassamento del livello.

In realtà, è la placca continentale scandinava a sollevarsi; tale situazione è dovuta al fatto che in un recente passato la regione scandinava era sovrastata da imponenti ghiacciai e che questi, sciogliendosi, hanno liberato dal carico la placca consentendole di risollevarsi. Pressoché tutti i porti scandinavi del Baltico sono soggetti a fenomeni di interrimento e quindi a periodici lavori per mantenerne l'accessibilità

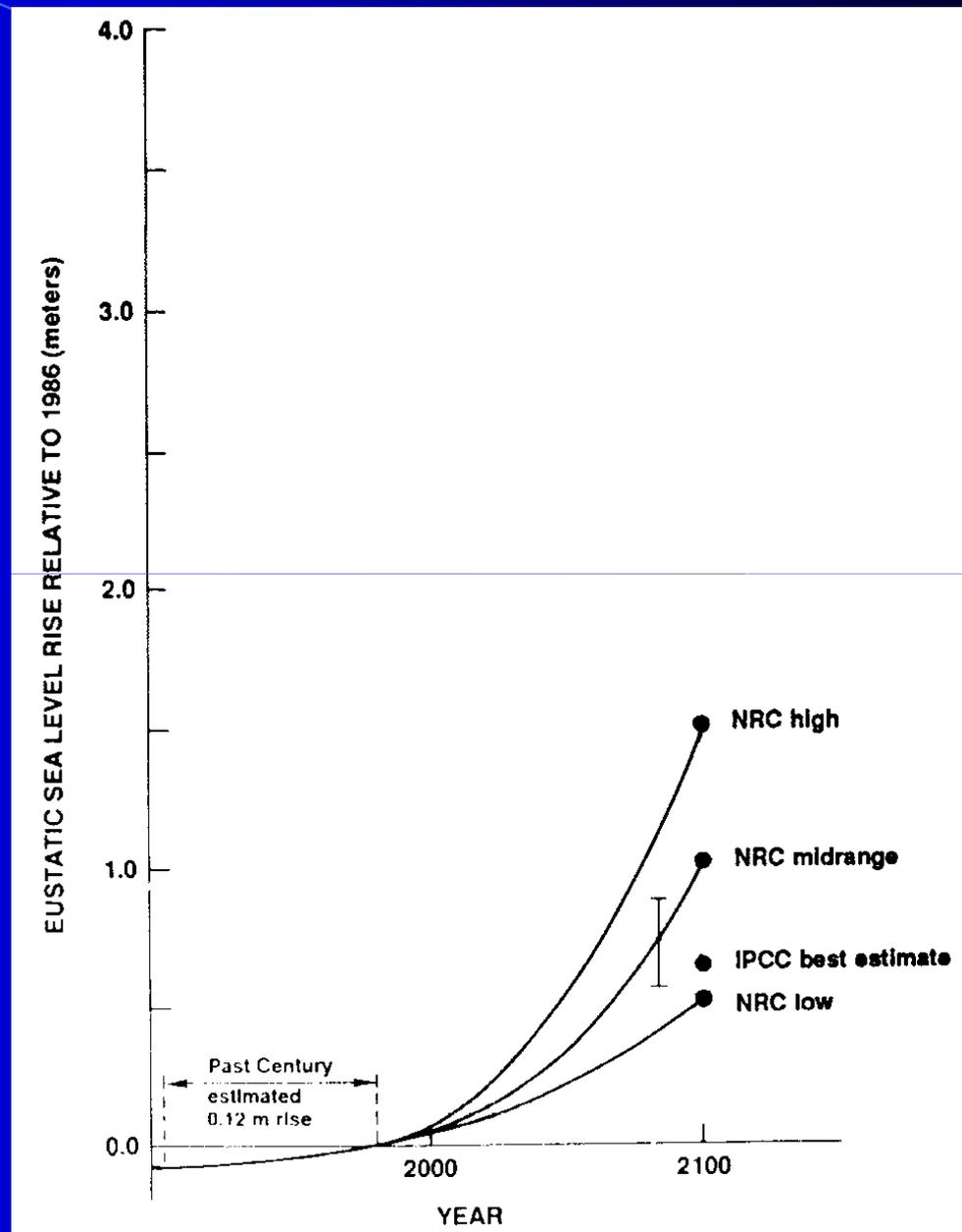
Livello del mare (mm)



Livello del mare (mm)



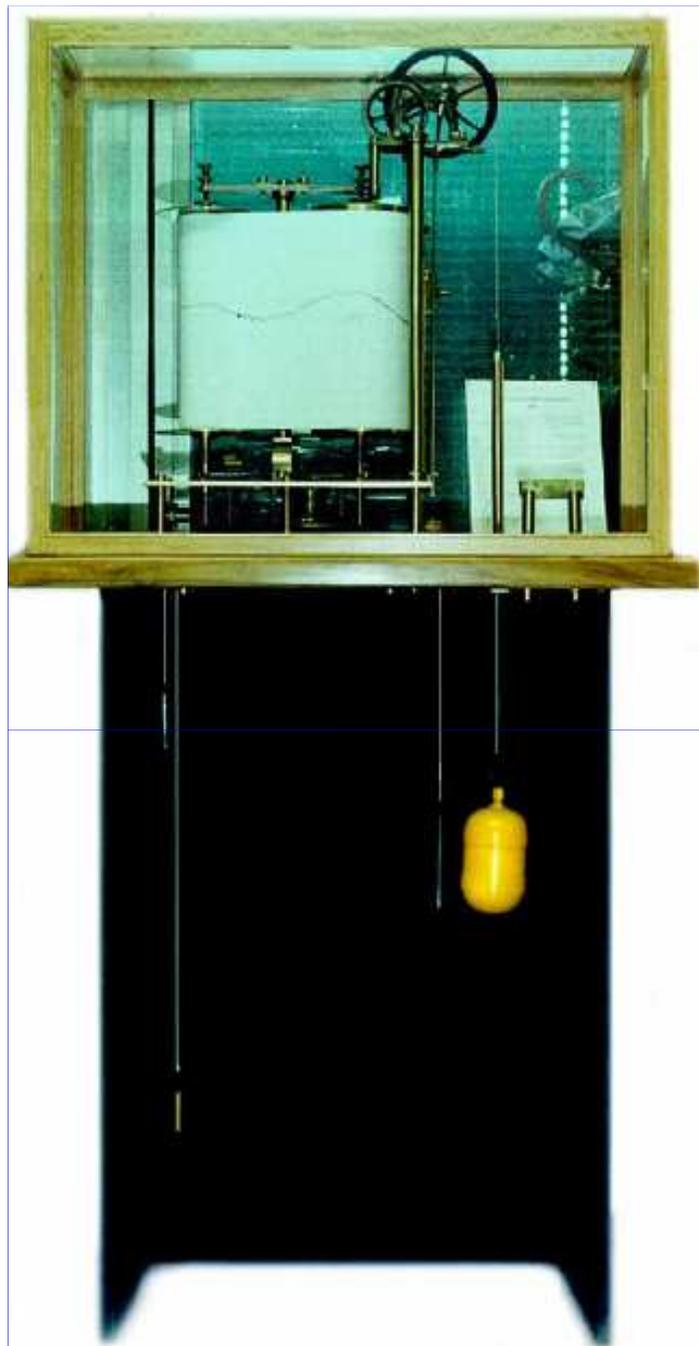
Lo scioglimento dei ghiacci (in parte compensato da un aumento delle precipitazioni nevose sul continente antartico) e soprattutto l'aumento delle precipitazioni piovose farà forse aumentare il livello dei mari come mostra la figura, tratta da uno studio dell'U.S. National Scientific Research che propone tre possibili scenari di aumento del livello.



L'andamento del Livello Medio del Mare (LMM) di lungo periodo viene misurato per mezzo dei mareografi

Grazie ai mareografi è dunque possibile:

- studiare e prevedere le maree,
- stabilire il livello medio del mare (si identifica il geoide), da cui vengono misurate tutte le “quote” (elevazioni) in terraferma,
- misurare l'andamento di lungo periodo del L.M.M.



Il mareografo fondamentale di Genova

Mareografo tipo "Thomson" costruito presso l'Istituto Idrografico, che reca infatti la scritta "Ufficio Idrografico no 1 1887". E' uno strumento meccanico, caricato settimanalmente, con movimento a orologeria, munito di galleggiante parzialmente zavorrato, pendolo a mercurio e contrappeso di carica; un secondo peso assicura la tensione della carta di registrazione, che è avvolta sul tamburo di carica e scorre su di un secondo tamburo, per essere recuperata dal terzo. La registrazione dei valori avviene mediante pennino a serbatoio d'inchiostro, mentre il rapporto di riduzione tra l'escursione della marea e la rappresentazione grafica è di 1/5. Mareografi dello stesso tipo, anch'essi costruiti presso l'I.I.M., sono ancora in uso presso le stazioni mareografiche di Genova e Brindisi e costituiscono un utile sistema di confronto con i moderni mareometri digitali, che hanno il pregio di poter essere interrogati, azionati e scaricati, via modem, direttamente dall'Istituto Idrografico.

Il livello del mare non subisce solo oscillazioni di periodo così lungo come quelle dovute ai fattori appena citati; da un punto di vista pratico assumono importanza soprattutto le oscillazioni di periodo più breve che possiamo riassumere in:

- maree astronomiche
- "storm surge"
- sesse
- marea polare

Tutti questi fenomeni vengono "amplificati" in misura variabile a seconda della conformazione topografica dei bacini (fenomeno della *risonanza*¹).

[1] Un fenomeno a carattere periodico, anche se la sua intensità è limitata, può esaltare i suoi effetti e produrre sollecitazioni fortissime se determina una **risonanza** in un sistema. La risonanza si verifica quando la forza periodica agisce su un "corpo" il cui periodo di oscillazione proprio (determinato dalle dimensioni e dalla distanza tra i punti) coincida o sia multiplo di quella sollecitante. Anche i bacini marini hanno propri periodi di risonanza.

Le maree astronomiche

La marea rappresenta il più cospicuo dei movimenti periodici delle masse liquide esistenti sulla superficie terrestre. Essa è dovuta alle attrazioni che gli astri esercitano su tali masse e trova la sua naturale spiegazione nella legge generale dell'attrazione universale scoperta da Isacco Newton (1642-1727).

Lo stesso Newton dimostrò come l'intima connessione fra la marea e i movimenti del Sole e della Luna, fosse una necessaria conseguenza di tale legge.

Le maree costituiscono un capitolo assai complesso dello studio dell'oceanografia; tralasciando le dimostrazioni matematiche, verranno illustrati i concetti principali e la dimensione qualitativa del fenomeno.

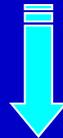
I passi seguiti saranno:

- un accenno alla cosiddetta *teoria statica* che dimostra la dipendenza del fenomeno dalle cause astronomiche, evidenzia i caratteri principali del fenomeno, ma non ne consente una quantificazione o previsione;
- l'esame delle *maree reali*, che evidenzia le differenze che esistono tra la teoria statica ed il fenomeno che si verifica nella realtà;
- lo *sviluppo armonico della marea* che, indipendentemente dalle cause che generano le maree, consente di quantificarne gli effetti e quindi di poter effettuare la previsione del fenomeno;

La teoria “statica” delle maree

La teoria statica delle maree

- limitando lo studio della marea al sistema Terra-Luna, trascurando la presenza di altri astri;
- pensando che Terra e Luna siano di forma sferica e omogenee;
- assumendo che tutta la superficie terrestre sia coperta da uno strato d'acqua continuo;
- trascurando la rotazione della Terra intorno al proprio asse;
- ricordando che la Luna è dotata di un movimento di rivoluzione sinodica (anche detta lunazione o mese lunare: il tempo che la luna impiega per riprendere la stessa longitudine celeste del sole) intorno alla Terra che si compie in 29,53 giorni.



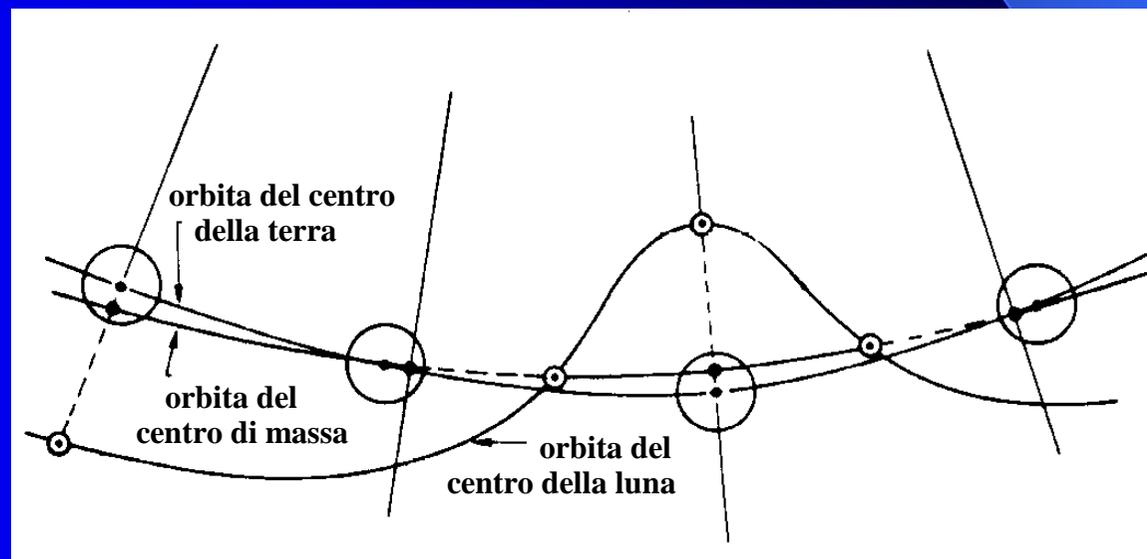
... secondo tale teoria le particelle d'acqua poste sulla superficie terrestre sono soggette a due forze:

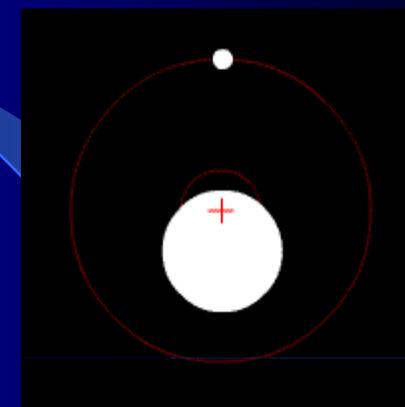
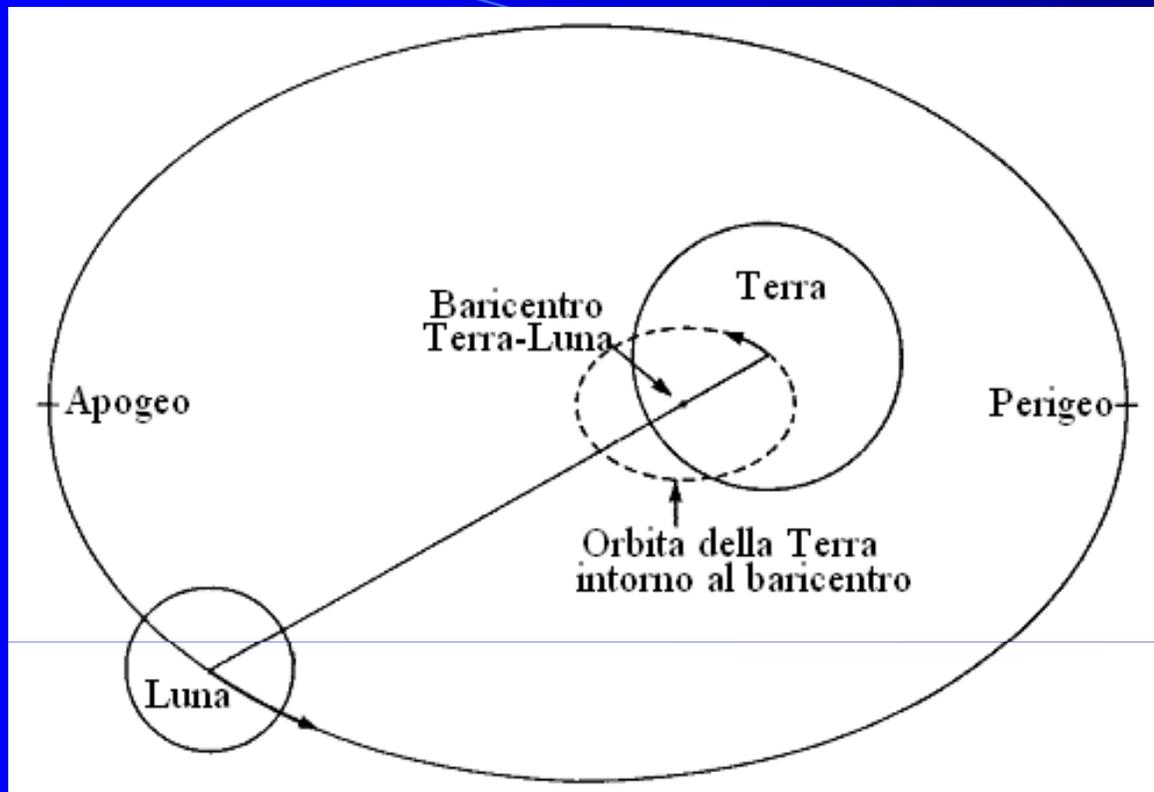
- **la forza di attrazione gravitazionale dovuta alla Terra e alla Luna**
- **la forza centrifuga dovuta alla rotazione di Terra e Luna intorno al comune centro di massa**

Forza centrifuga e attrazione gravitazionale: se la Terra e la Luna non ruotassero intorno al comune centro di massa, non si verrebbe a generare quella forza centrifuga che equilibra l'attrazione gravitazionale tra le due masse ed impedisce che i due astri si scontrino.

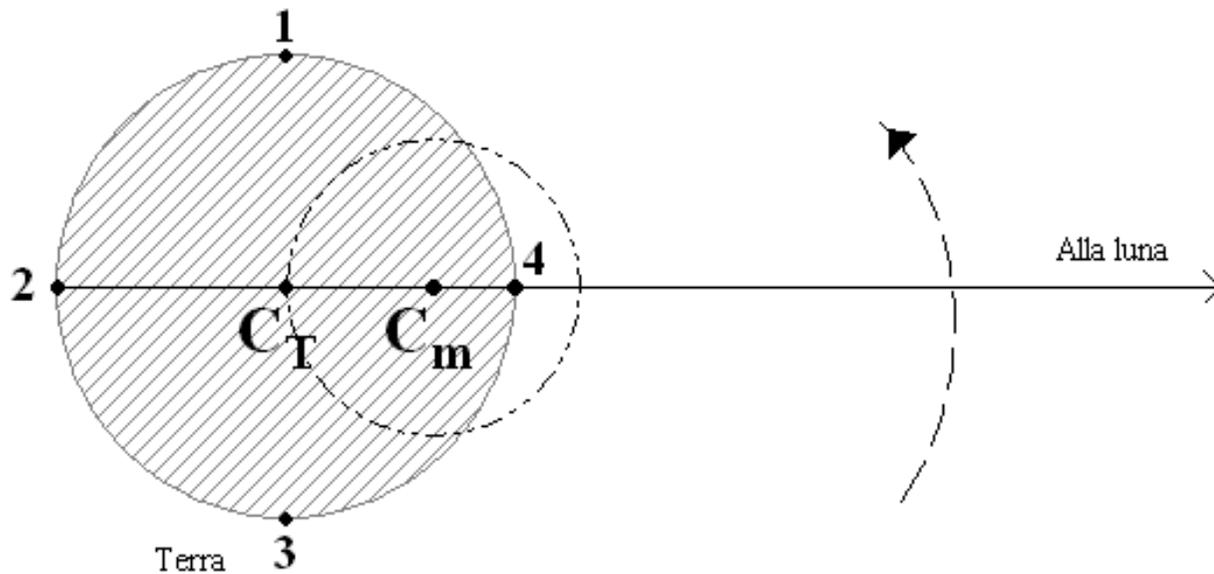
Istante per istante infatti la forza di attrazione gravitazionale esercitata dalla Terra sulla Luna è equilibrata dalla forza centrifuga originata dalla rivoluzione della Luna intorno alla Terra; allo stesso modo la forza di attrazione che la Luna esercita sulla Terra è equilibrata dalla forza centrifuga originata dal movimento della Terra intorno al comune centro di massa.

La rivoluzione lunare intorno alla Terra avviene intorno al centro di massa del sistema: è il centro di massa del sistema Terra-Luna che compie un'orbita di tipo "kepleriano" intorno al sole .



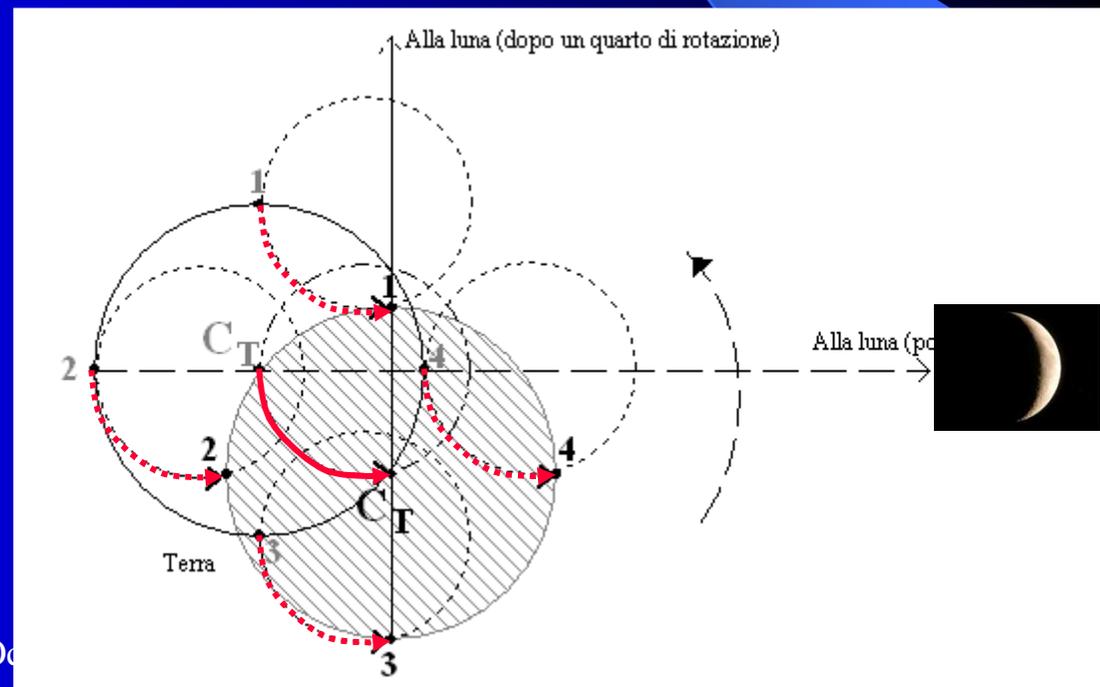


Il centro di massa, poiché la massa della Terra è circa 81 volte la massa della Luna, si trova a circa due terzi del raggio terrestre sulla congiungente Terra-Luna.



Consideriamo adesso i punti 1, 2, 3, 4 sulla superficie terrestre

Dopo un quarto del movimento della Terra intorno al centro di massa, i punti 1, 2, 3, 4 si saranno portati nella posizione in figura (tra le ipotesi poste si trascurava la rotazione della Terra intorno al proprio asse).

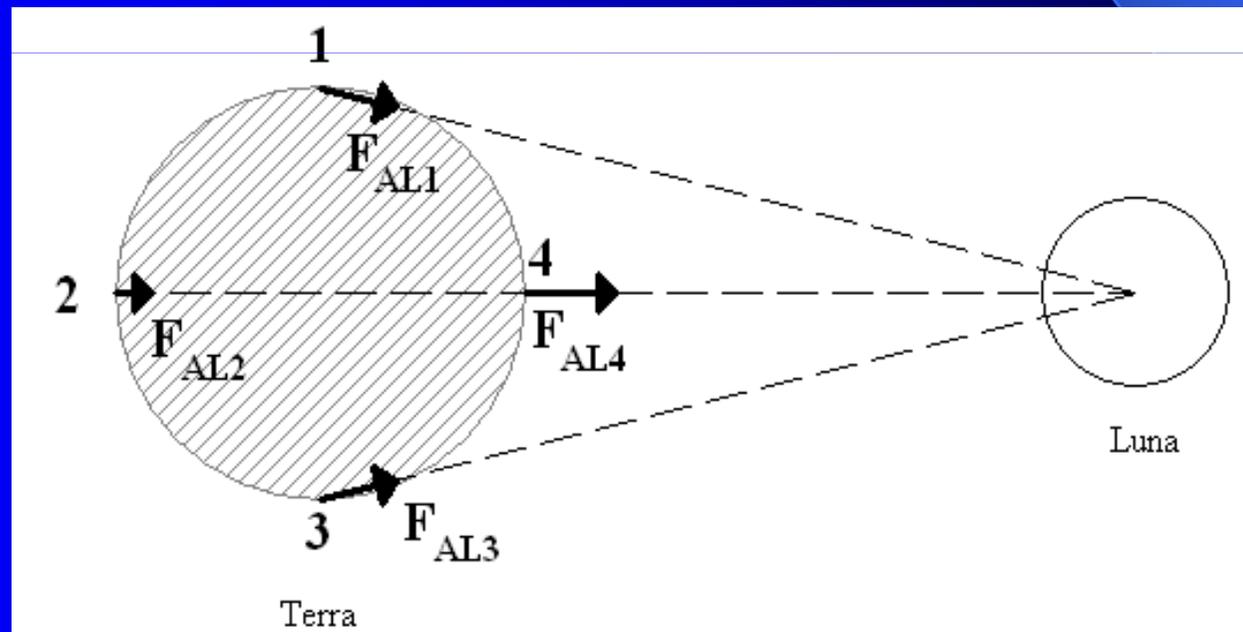


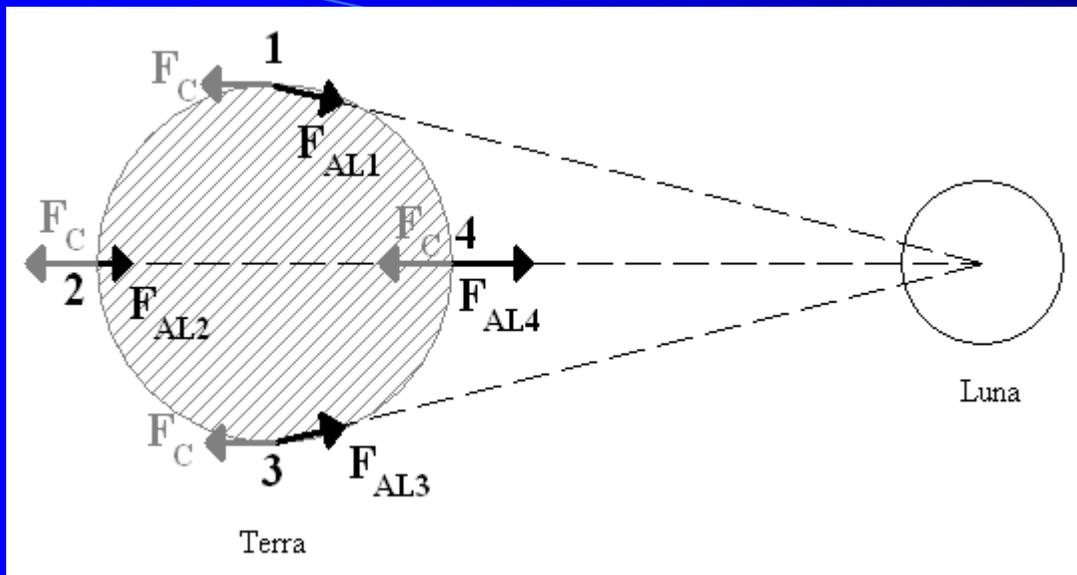
Immaginando di completare la rotazione del centro della Terra intorno al centro di massa, si intuisce che i punti 1, 2, 3 e 4 descrivono una circonferenza (nella figura precedente è punteggiata) di raggio pari alla distanza *centro Terra - centro di massa*.

Poiché tutti i punti descrivono la stessa circonferenza si arriva all'importante conclusione che *tutti i punti della Terra sono soggetti ad una identica forza centrifuga* dovuta appunto alla rotazione intorno al centro di massa e che questa forza è *diretta secondo la congiungente istantanea Terra-Luna* (ricordare che non si sta considerando per adesso l'effetto della rotazione della Terra intorno al proprio asse).

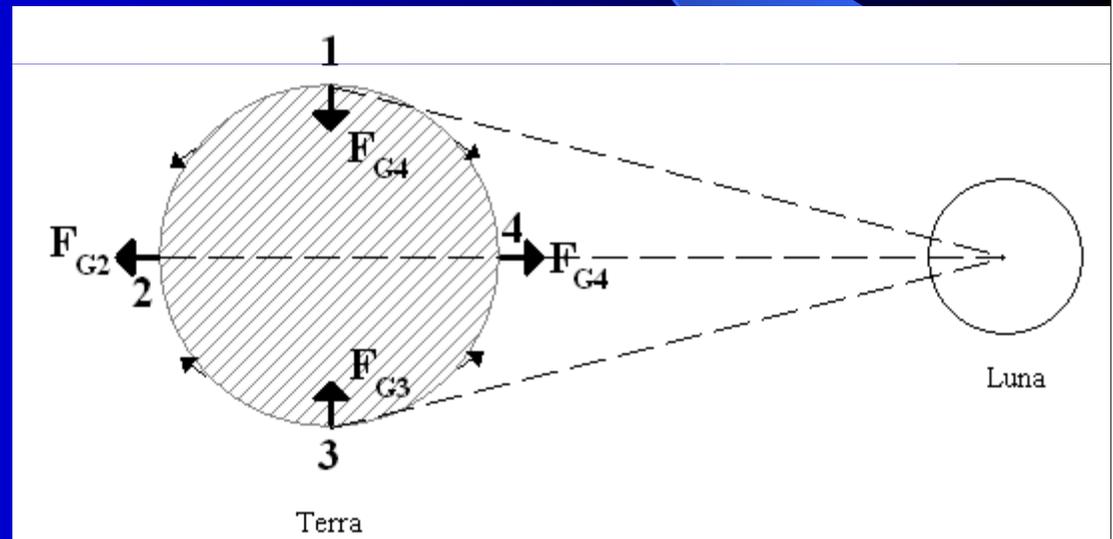
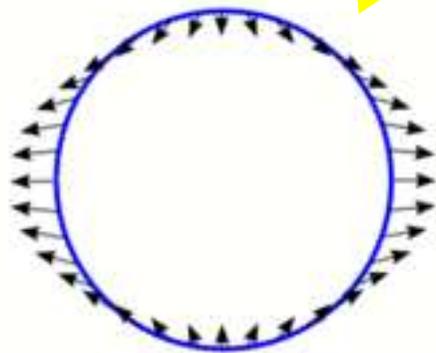
Il modulo della forza, stante l'equilibrio del sistema Terra-Luna sarà pari alla forza di attrazione che la luna esercita sul centro della Terra.

La forza di attrazione lunare è invece diretta verso il centro della Luna così come illustrato nella Figura, in cui la vicinanza tra Luna e Terra è molto esagerata; il modulo della attrazione gravitazionale lunare non è rappresentato fedelmente, ma vuole far capire come l'attrazione è massima nel punto 4, assume valori intermedi nei punti 1 e 3 ed è minima nel punto 2. Inoltre poiché nel centro della Terra è $F_c = F_{AL(CT)}$, e la F_c è uguale in tutti i punti della Terra, si avrà che, *in modulo*, nel punto 2 la F_c è maggiore della F_{AL1} , nel punto 4 la F_c è minore della F_{AL4} , nei punti 1 e 3 la F_c è leggermente maggiore della F_{AL1} e della F_{AL3} .





..... risultante



Nei punti 1, 2, 3 e 4 la risultante è “radiale”; nei punti intermedi la forza è soprattutto parallela e quasi orizzontale alla superficie terrestre.

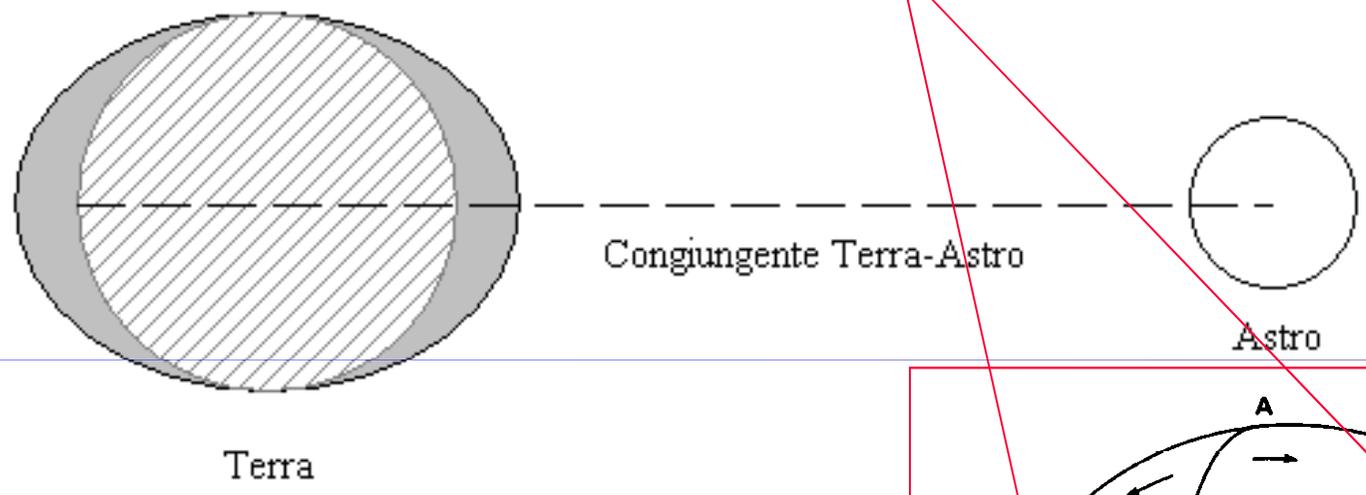
Sotto l'azione della forza generatrice di marea le particelle d'acqua, che abbiamo ipotizzato avere spessore continuo e uniforme, si dispongono secondo una superficie ellissoidica che ha il proprio asse maggiore orientato lungo la congiungente istantanea Terra-Luna.

Della forza di marea si possono considerare la *componente verticale* (diretta come la gravità terrestre) che provoca una lievissima fluttuazione del peso e la *componente orizzontale* che provoca invece scorrimenti orizzontali anche cospicui delle masse d'acqua (correnti di marea) a loro volta responsabili di variazioni del livello dei bacini.

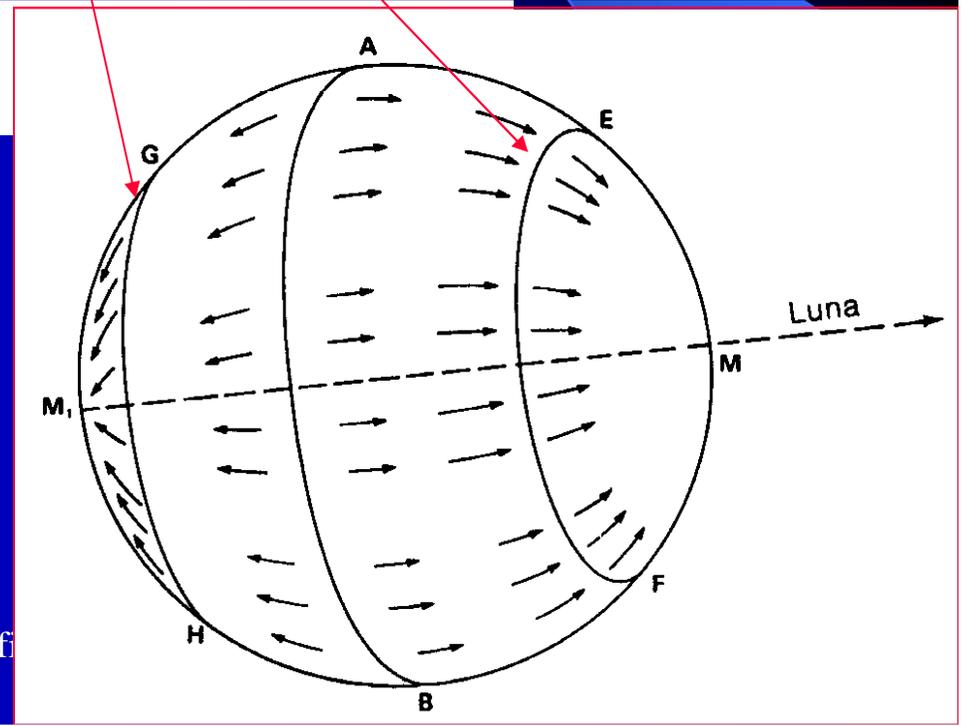
La componente orizzontale produce quello spostamento orizzontale dell'acqua che si chiama *onda di marea* e da cui derivano tutti i fenomeni delle maree. Le componenti verticali e quelle orizzontali sono dello stesso ordine di grandezza e valgono circa un novemilionesimo della forza gravitazionale terrestre.

La componente orizzontale è:

- *nulla* nei punti lunare ed antilunare ed in quelli del cerchio massimo AB
- *massima* nei punti dei due cerchi minori EF e GH che, congiunti con il centro della Terra formano con la congiungente centro Terra - centro Luna o con il suo prolungamento un angolo di 45°



massima



Maree teoriche dovute all'azione combinata del Sole e della Luna

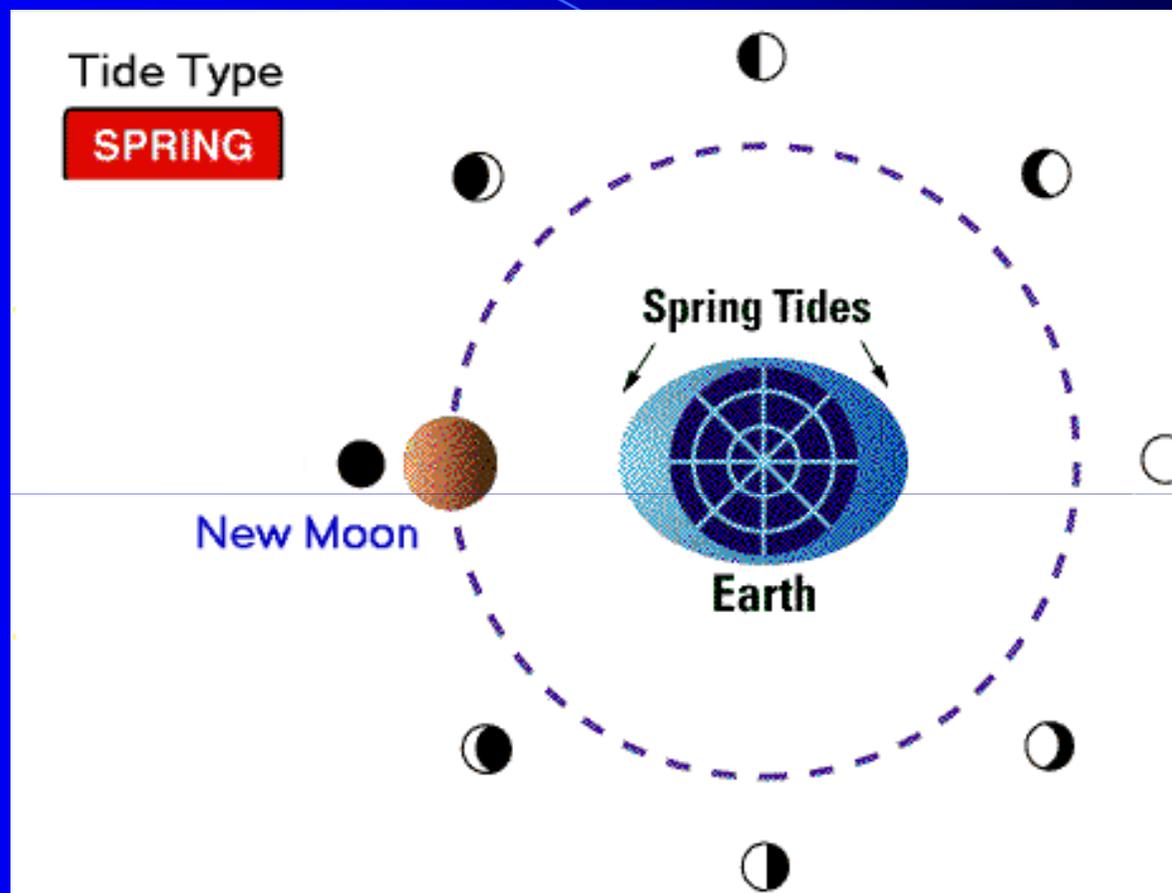
E' noto dalla cosmografia che, ruotando intorno alla Terra, la Luna assume posizioni diverse rispetto al Sole, dando luogo al ben noto fenomeno delle *fasi lunari*, e che le quattro posizioni principali sono:

- a) *luna nuova o congiunzione*
- b) *primo quarto*
- c) *luna piena o opposizione*
- d) *ultimo quarto*

E' noto altresì che fra una delle suddette posizioni e la successiva trascorre un intervallo di poco più di sette giorni, e che il periodo completo in cui si ripetono le fasi è di 29,53 giorni (mese lunare o lunazione).

Inoltre sia il Sole che la Luna variano la propria declinazione ed i parametri dell'orbita nel corso del tempo. La marea lunisolare teorica può quindi essere studiata, nelle sue conseguenze pratiche, sommando gli ellissoidi di marea dei due astri nelle varie situazioni astronomiche.

Sole



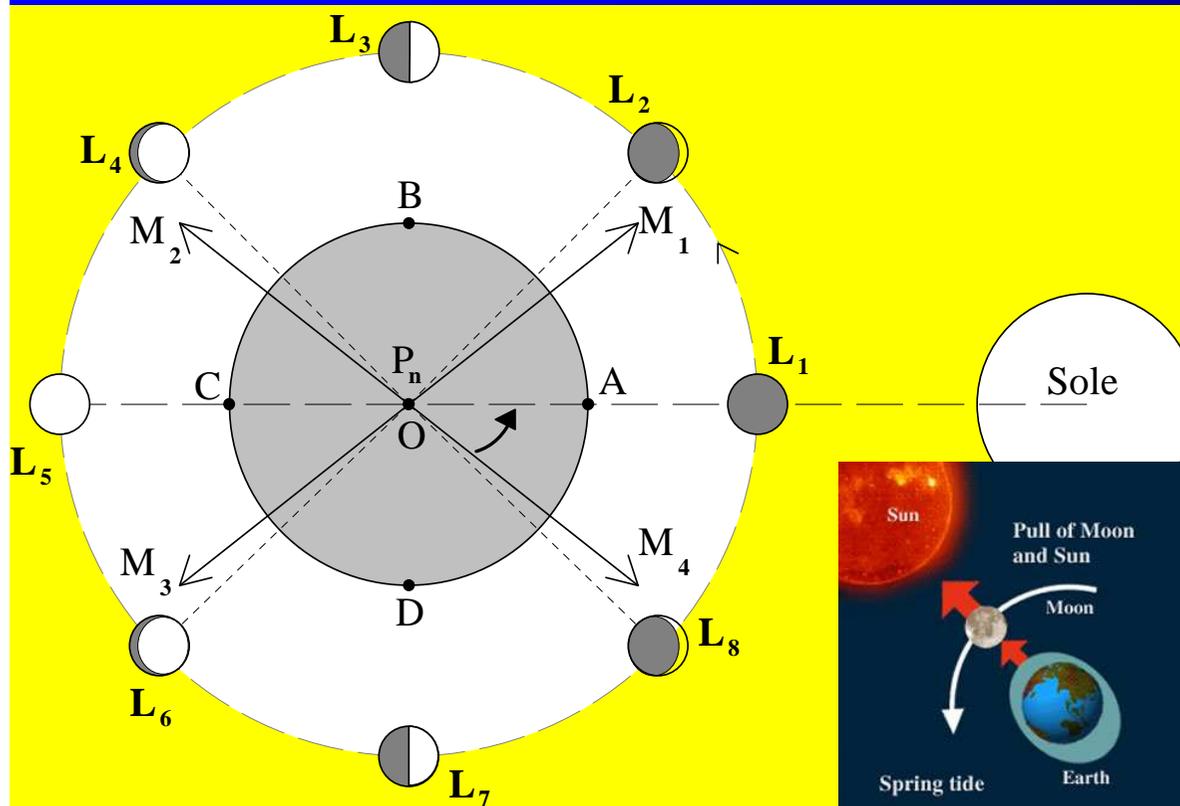
Luna in L1

Ampiezza

Con il novilunio i due astri producono due ellissoidi di marea i cui assi maggiori coincidono dando luogo ad una marea lunisolare che è la somma delle maree prodotte dai due astri. Si ha un'alta marea in A (somma della alta marea lunare e della alta marea solare) ed in C (somma della alta marea antilunare e della alta marea antisolare), mentre si ha bassa marea lunisolare in B ed in D. Poichè le forze di attrazione lunare e solare sono concomitanti, le alte maree sono più “alte” e le basse maree più “basse” che nelle altre posizioni. Questa situazione è detta di *sizigia*.

Fase

Considerando la rotazione della Terra intorno al proprio asse nel senso indicato dalla freccia, i punti della superficie terrestre si trovano con il proprio meridiano in direzione di Luna e Sole, **simultaneamente** al passaggio dei due astri al meridiano ed all'antimeridiano rispettivamente.

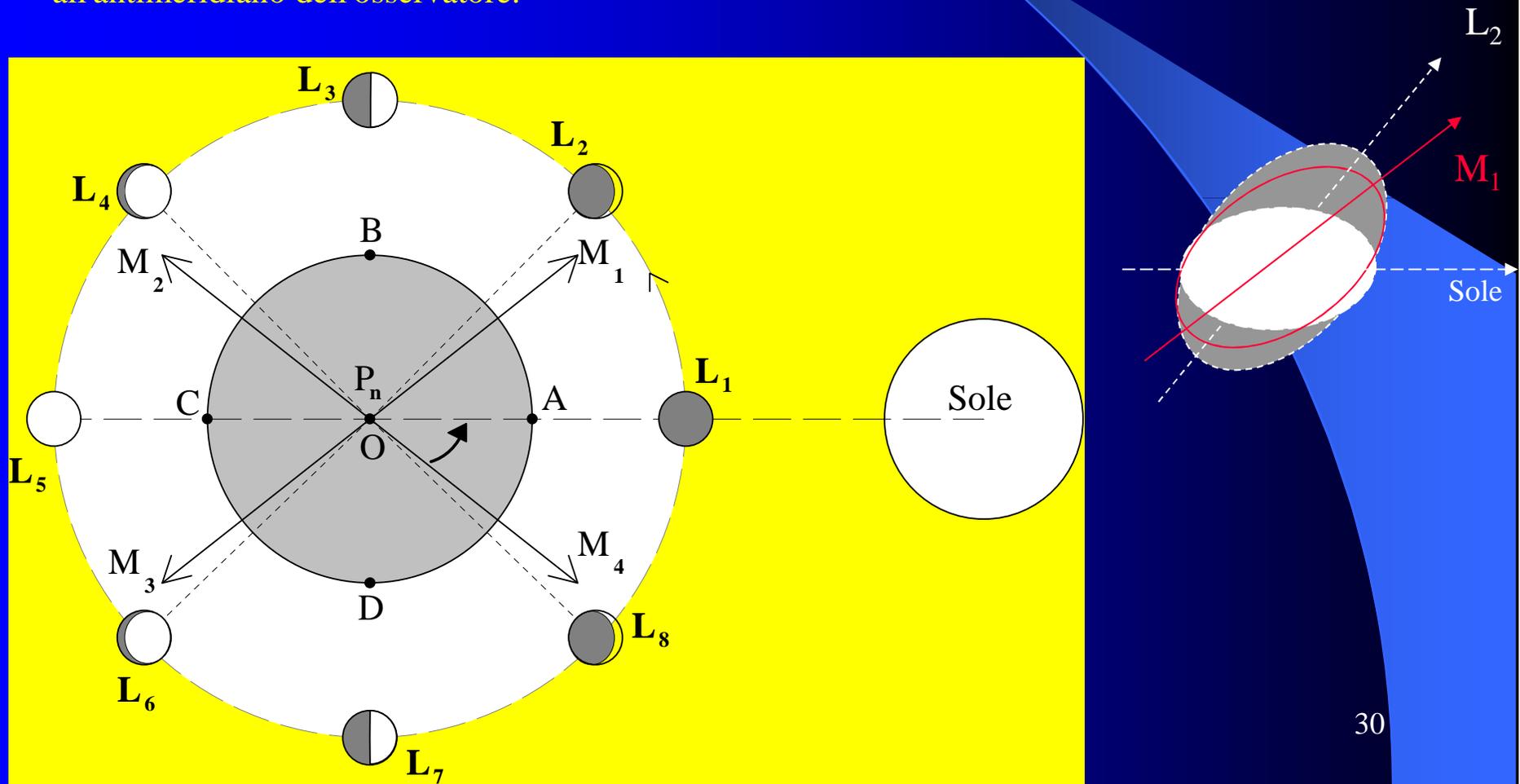


Sempre per la rotazione terrestre l'osservatore nel punto A, dopo circa un quarto di giorno lunare (circa 6 ore e 12 minuti), verrà a trovarsi in B e sarà soggetto ad una bassa marea.

L'altezza delle maree, così come in tutti i casi successivi, è massima nei punti situati all'equatore e tanto più piccola quanto più elevata è la latitudine.

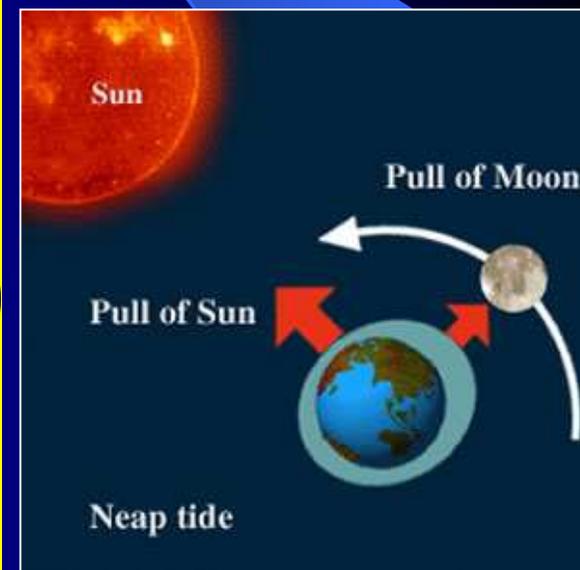
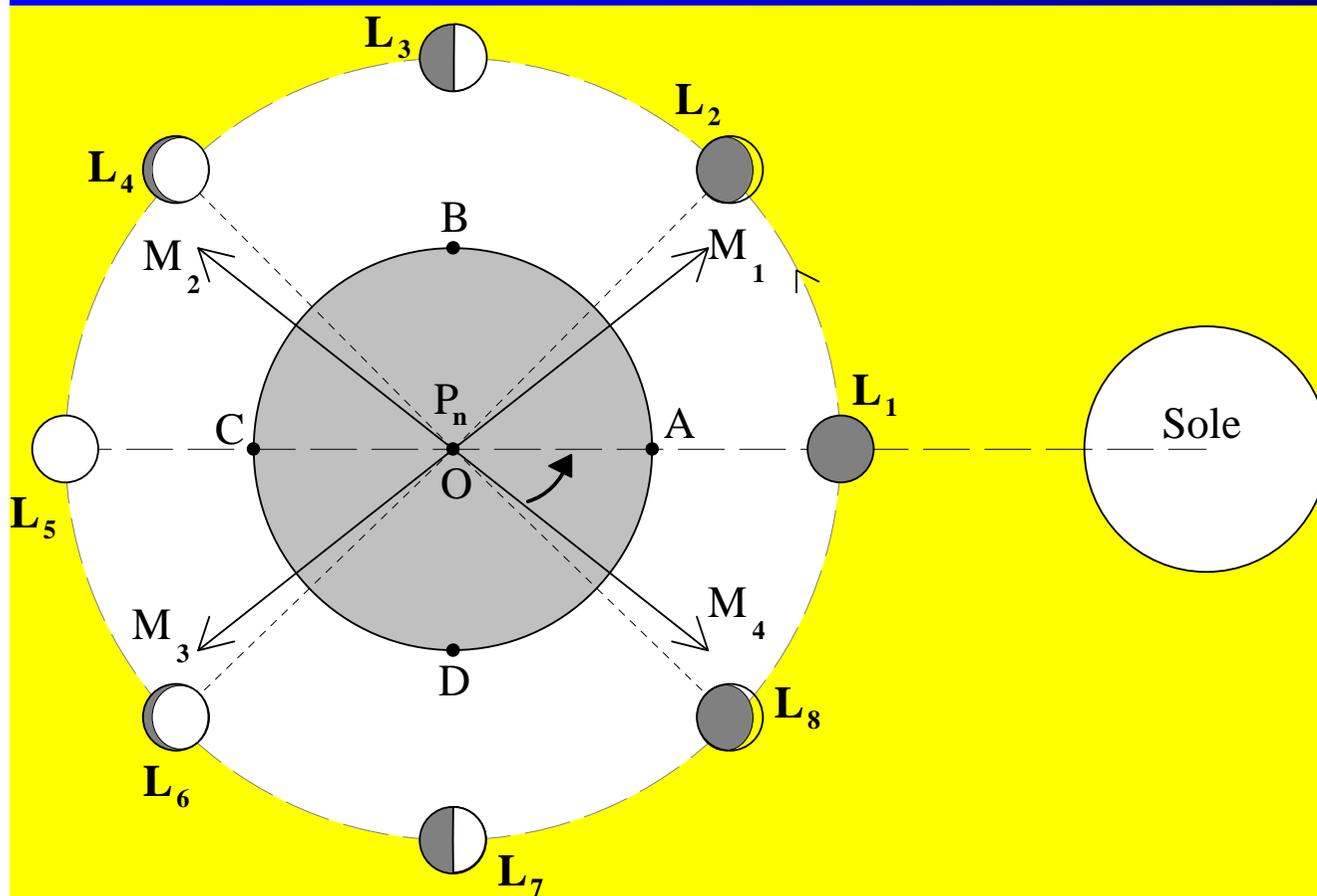
Luna in L2

Nei giorni tra la luna nuova ed il primo quarto, gli assi degli ellissoidi di marea lunare e solare, sempre diretti verso i rispettivi astri formano angoli diversi dando luogo ad un ellissoide di marea lunisolare il cui asse maggiore ha una direzione intermedia. L'asse maggiore della marea lunisolare assume infatti la direzione M3-M1 compresa tra le direzioni O-L2 e O-Sole. L'alta marea in questo periodo pertanto si verifica *prima* che la luna passi al meridiano o all'antimeridiano dell'osservatore.



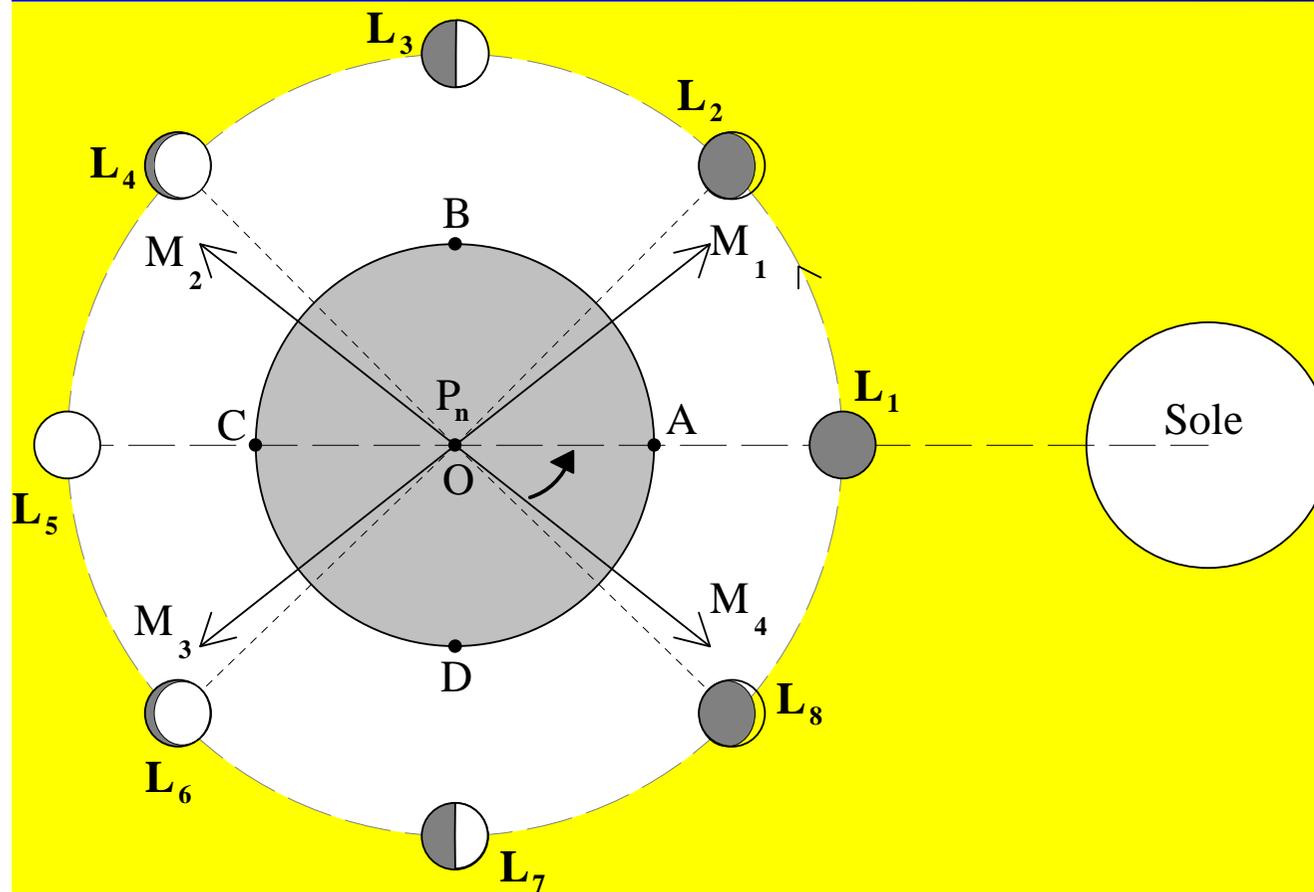
Luna in posizione L3

Al primo quarto l'asse maggiore dell'ellissoide di marea lunare è perpendicolare all'asse maggiore dell'ellissoide di marea solare: si ha alta marea lunare in B, alta marea antilunare in D, mentre in A e in C si ha una bassa marea lunare. In questa situazione le alte maree dovute alla Luna coincidono con le basse maree dovute al sole. Si avranno quindi in B e D alte maree lunisolari meno alte e basse maree meno basse che nella situazione precedente. Questa situazione è detta di *quadratura*. Anche in questo caso il fenomeno è simultaneo al passaggio della Luna al meridiano e antimeridiano dell'osservatore.



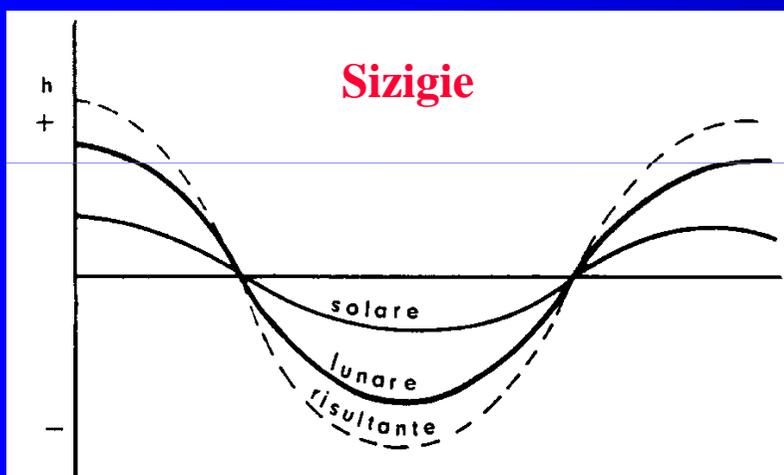
Luna in posizione L4

Nei giorni tra il primo quarto e il plenilunio, l'asse maggiore della marea lunisolare assume la direzione Terra-M2 compresa tra le direzioni Terra-L4 e Terra-Sole. L'alta marea in questo periodo pertanto si verifica *dopo* che la luna è passata al meridiano o all'antimeridiano dell'osservatore.

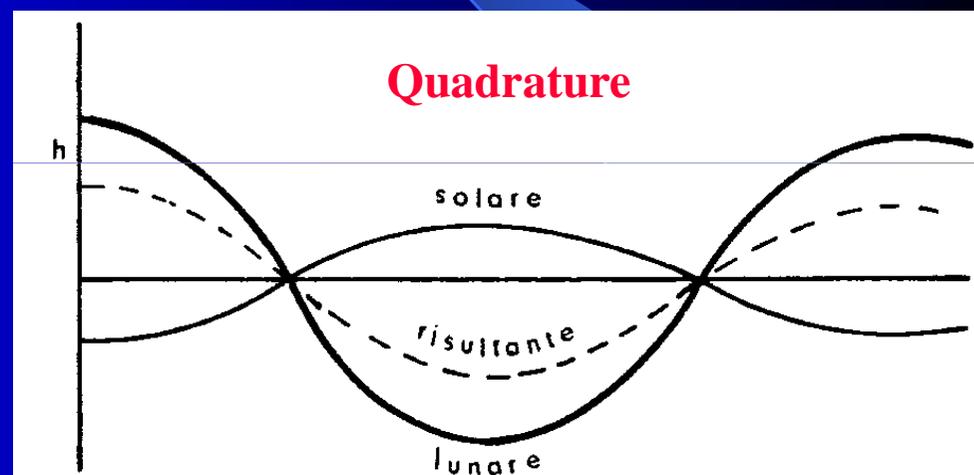


Ricapitolando:

- alle *sizigie* e alle *quadrature* le alte maree si verificano simultaneamente al passaggio della Luna in meridiano/antimeridiano,
- le maree alle sizigie hanno ampiezza maggiore che alle quadrature,
- nei giorni intermedi l'ampiezza di marea decresce via via che si passa dalle sizigie alle quadrature; aumenta tra le quadrature e le sizigie,
- nei giorni intermedi la marea raggiunge le massime altezze prima/dopo il passaggio della Luna in meridiano/antimeridiano.



Alle **sizigie** con luna e sole sullo stesso meridiano oppure con uno dei due astri sull'antimeridiano dell'altro, le onde di marea parziali solare e lunare sono in fase tra loro e la risultante è un'onda di marea lunisolare la cui ampiezza è la somma delle due



Alle **quadrature** le onde di marea parziali solare e lunare sono in opposizione di fase e la risultante è un'onda di marea lunisolare la cui ampiezza è la differenza delle due.

Ineguaglianza di fase

- *nelle altezze*

- Sizie

- le alte maree sono più alte
- le basse maree sono più basse
- l'escursione di marea è maggiore che alle quadrature

- Quadrature

- le alte maree sono meno alte
- le basse maree sono meno basse
- l'escursione di marea è inferiore che alle sizie

- *nelle ore*

- Sizie e Quadrature il fenomeno è contemporaneo al passaggio in meridiano/antimeridiano della Luna.

- Giorni intermedi: il fenomeno anticipa/ritarda rispetto al passaggio in meridiano/antimeridiano della Luna.



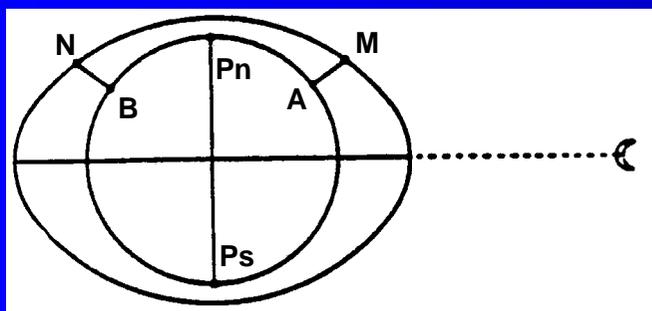
- il fenomeno anticipa: - tra novilunio e primo quarto
- tra plenilunio e ultimo quarto

- il fenomeno ritarda: - tra primo quarto e plenilunio
- tra ultimo quarto e novilunio

Effetto della declinazione

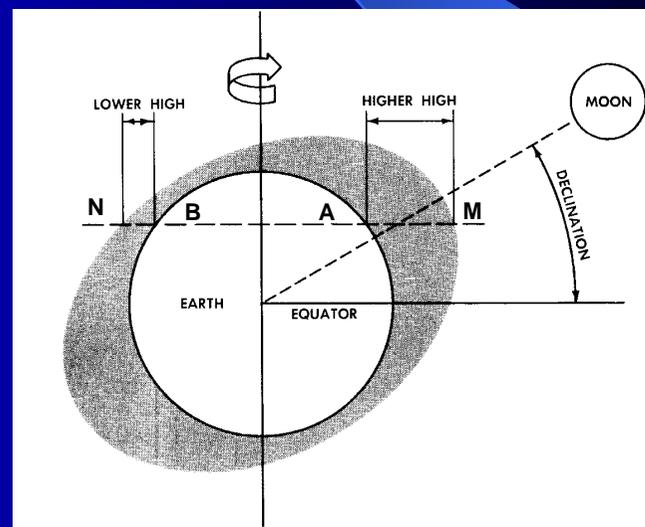
Finora abbiamo considerato la Luna e il Sole sul piano dell'equatore, ma è ben noto dall'astronomia che entrambi questi astri hanno un movimento in declinazione per il quale si allontanano notevolmente dal piano dell'equatore; la declinazione della Luna raggiunge il valore massimo variabile tra $18^{\circ}18'$ e $28^{\circ}36'$ Nord e Sud mentre quella del Sole assume i valori massimi di $23^{\circ}27'$ Nord e Sud.

A causa di tali movimenti anche gli assi maggiori dei rispettivi ellissoidi di marea si allontanano dal piano equatoriale, producendo nuovi effetti di marea che si manifestano con andamenti più complessi di quelli sinora esposti.



Quando la Luna si trova sul piano equatoriale, nei punti A e B (rispettivamente sul meridiano e sull'antimeridiano) si producono due maree uguali A-M e B-N.

Quando la Luna non si trova sul piano equatoriale produce negli stessi punti A e B due alte maree differenti tra loro



L'ineguaglianza diurna ha un periodo che dipende dal ciclo di variazione della declinazione lunare e solare. Un ciclo completo avviene ogni 18,61 anni.

C) VARIAZIONE DELLA DISTANZA MEDIA TERRA-LUNA E TERRA-SOLE

E' risaputo che la Luna descrive un'orbita ellittica intorno alla Terra, della quale questa occupa un fuoco e che la Terra descrive un'orbita ellittica intorno al Sole, di cui questo occupa un fuoco. La distanza della Luna dalla Terra varia da un valore minimo al perigeo ad un valore massimo all'apogeo, mentre la distanza dalla Terra al Sole varia da un valore minimo al perielio a un valore massimo all'afelio.

Essendo la forza di attrazione esercitata dai due astri inversamente proporzionale al quadrato della distanza essa è minima in corrispondenza della distanza massima. Per cui si hanno variazioni nell'altezza della marea il cui periodo è uguale a quello delle variazioni della distanza, ossia mensile per le maree lunari (ricordiamo però che l'eccentricità dell'orbita lunare varia con un periodo di 206 giorni) e annuo per le maree solari.

Le maree reali

LE MAREE REALI

Nella realtà il fenomeno della marea si manifesta con leggi assai più complesse di quelle teoriche. Le cause sono dovute a:

- irregolare distribuzione degli oceani e dei continenti sulla superficie terrestre
- irregolare topografia del fondo marino
- attrito che si sviluppa nella massa stessa delle acque
- azione delle onde di marea

Le conseguenze sono:

- le maree assumono altezze notevolmente superiori a quelle teoriche e sono estremamente variabili da località a località
- il fenomeno non è in fase con la situazione astronomica: l'alta marea ad esempio si può verificare con diverse ore di ritardo rispetto al passaggio della luna al meridiano/antimeridiano. Lo *stabilimento del porto* è la quantità, in ore e minuti, da aggiungere all'ora del passaggio in meridiano della Luna per ottenere l'ora dell'alta marea nel giorno del plenilunio o novilunio.

Le maree sizigiali possono inoltre verificarsi anche con 2-3 giorni di ritardo rispetto alla situazione astronomica di novilunio o plenilunio. L'*età della marea* è appunto l'intervallo di tempo, espresso in giorni e frazioni di giorno, compreso tra il verificarsi del fenomeno astronomico e la particolare marea causata da esso. Questo intervallo varia da zero a 3 giorni.

Si ritiene che maree simili a quelle teoriche si sviluppino solo nell'emisfero Australe, oltre il parallelo 50°S, perché soltanto tra questo parallelo e l'Antartide si ha un'ampia zona di mare libero e profondo che circonda il globo. Qui si produce un'onda di marea *primaria* che si sposta da Est verso Ovest seguendo il moto diurno del Sole e della Luna, provocando un'alta marea pressoché simultanea in tutti i punti situati sullo stesso meridiano.

Tale onda non può invece propagarsi liberamente negli oceani Atlantico, Pacifico e Indiano: urtando contro i continenti viene riflessa in modo da formare onde *secondarie*, ritardate rispetto a quella primaria e che si sovrappongono a quelle prodotte direttamente dalle attrazioni lunare e solare. A determinare i caratteri delle onde secondarie intervengono i fattori geografici, rappresentati dall'estensione e dall'orientamento delle coste e dalla topografia dei fondali.

Le svariate influenze geografiche e topografiche conferiscono al fenomeno della marea caratteristiche assai diverse da luogo a luogo: è pertanto necessario effettuare lo studio del fenomeno mediante l'osservazione sistematica delle sue particolarità nei vari punti del globo. L'orientamento della costa rispetto alla direzione di propagazione dell'onda proveniente dal mare aperto influisce profondamente sui caratteri della marea dando luogo a deviazioni, riflessioni, ritardi delle onde che fanno talvolta assumere forma speciale alle maree di alcune località. La conoscenza esatta di queste particolarità consente di risolvere il problema della previsione dell'andamento di marea in qualsiasi punto.

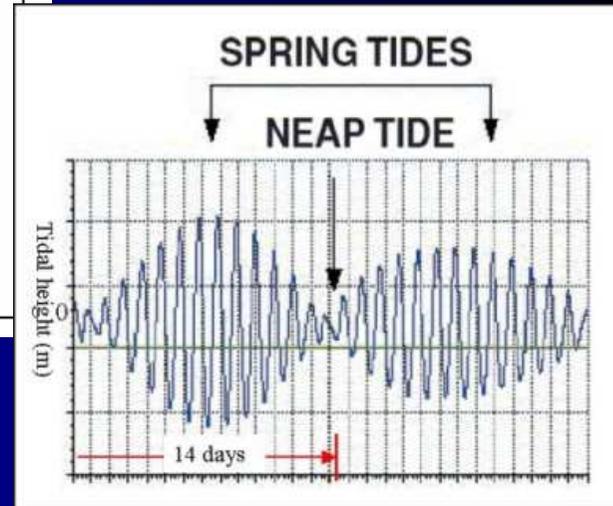
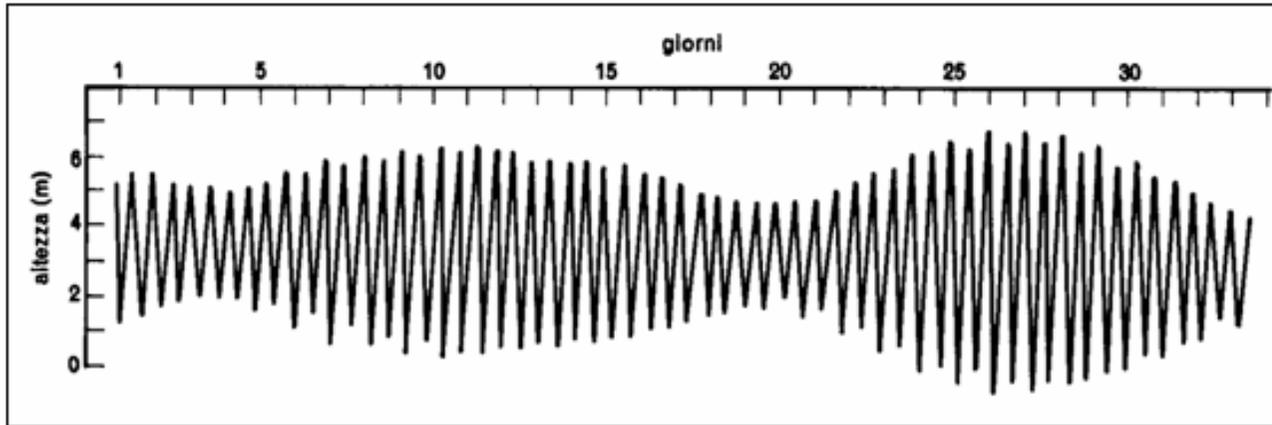
La risonanza dei bacini tende poi ad esaltare in alcuni casi le sole oscillazioni di tipo diurno oppure quelle di tipo semidiurno conferendo al fenomeno caratteristiche *diurne* o *semidiurne*.

L'osservazione mostra che:

- in mare aperto le maree raggiungono in generale piccole escursioni
- lungo le coste degli oceani, specie in presenza di estese piattaforme continentali, si hanno le maggiori escursioni di marea
- nei mari chiusi, come il Mediterraneo, le escursioni sono in genere assai piccole
- nei golfi, nei canali, negli estuari dei fiumi, lungo le coste frastagliate si ha una sorta di amplificazione del fenomeno e quindi si raggiungono escursioni maggiori
- in certe baie ed alle foci di alcuni fiumi che si restringono rapidamente si hanno ampiezze che raggiungono valori eccezionali: all'ingresso della ben nota baia di Fundy (Canada) l'escursione è di circa 3 metri alle sizigie, al suo interno invece l'escursione raggiunge mediamente i 15-16 metri. Nell'Europa del Nord si osservano ampiezze di 14 metri nel Canale di Bristol e di 12 metri a Granville presso S. Malò

◆ semidiurne

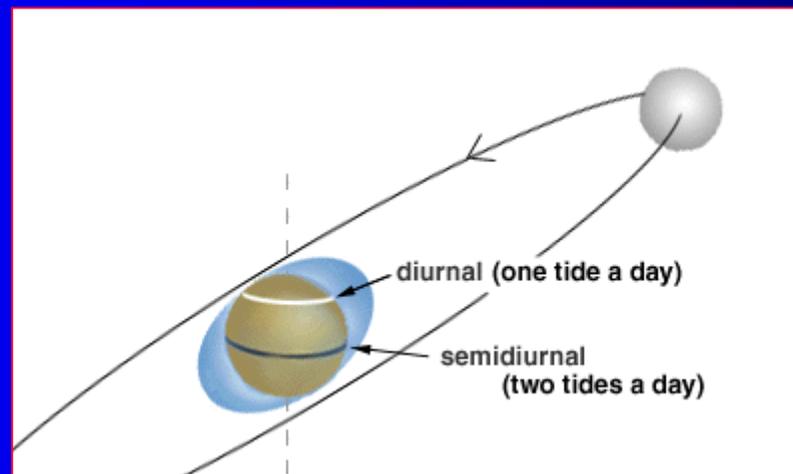
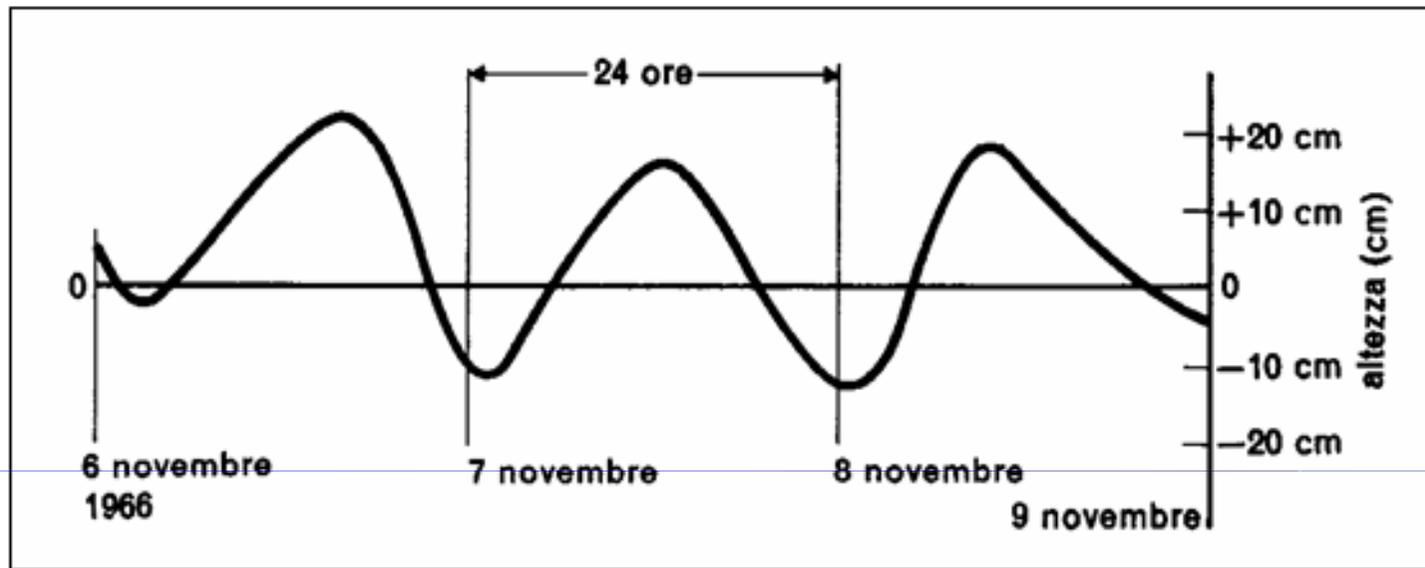
due alte e due basse maree con valori delle due alte e delle due basse pressoché uguali in altezza e intervallate, l'alta dalla bassa, di circa 6^h12^m (esempio in riferito all'estuario del fiume Humber, nel mare del Nord),



Un anno di marea a Dover

◆ diurne

una sola alta ed una sola bassa marea; questo fenomeno è limitato a poche località ed ha piccola ampiezza (esempio relativo al porto di Ancona),



◆ *miste*

due alte e due basse con valori tra di loro estremamente diversi in altezza.

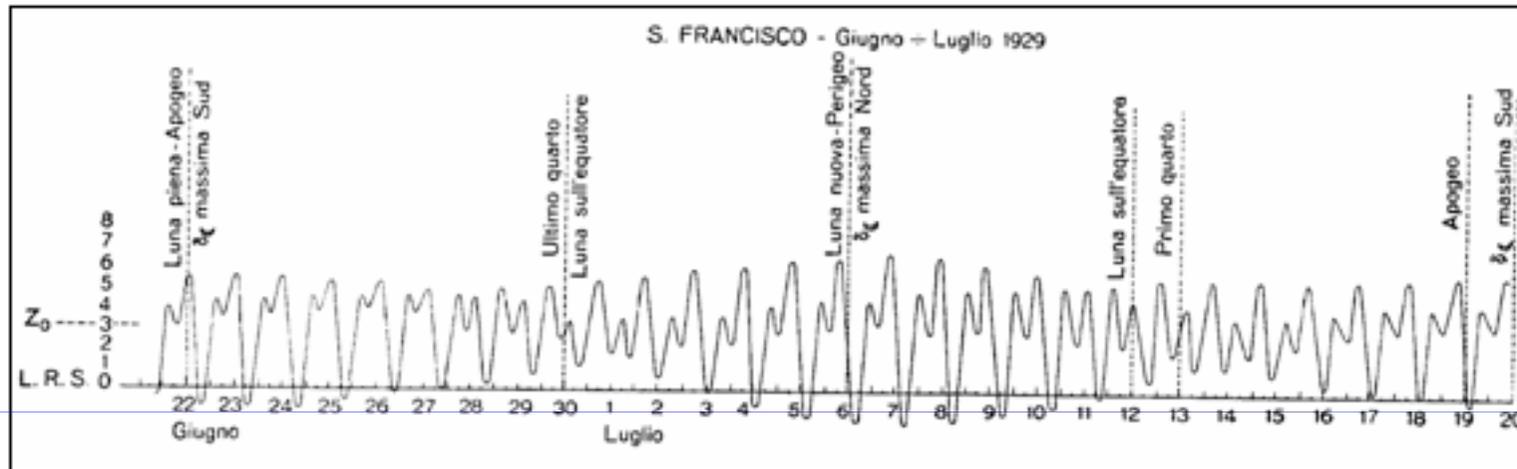
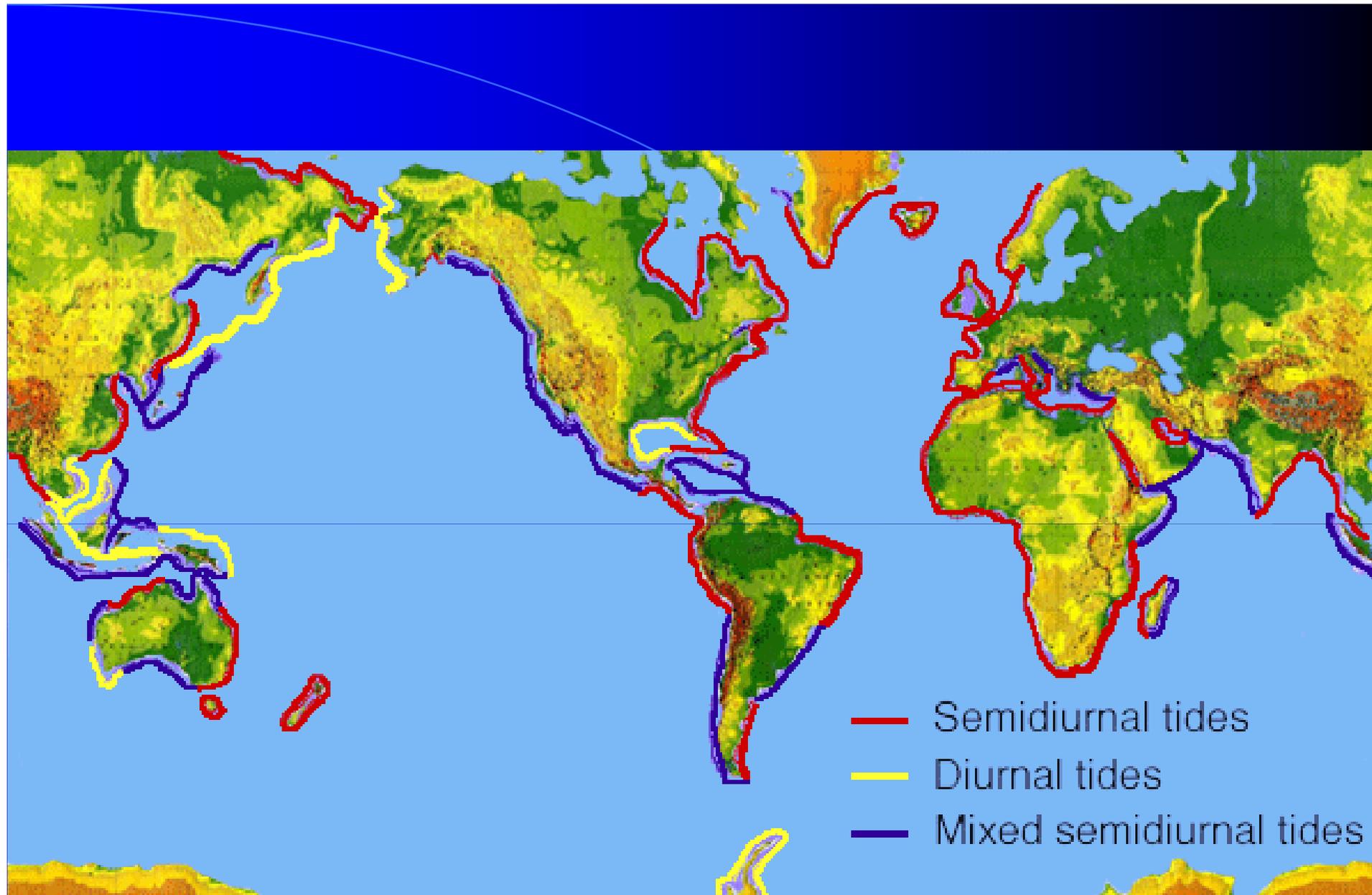


Fig 7.19

Vi sono poi delle località che presentano, nel corso del tempo, un'alternanza della marea diurna con quella semidiurna (ad esempio, Venezia, S.Diego, S.Francisco): anche queste si dicono *miste*.



Lo sviluppo armonico delle maree

Lo sviluppo armonico delle maree

La previsione della marea in una certa località non può essere effettuata applicando la teoria statica in quanto non viene considerata l'irregolare conformazione dei bacini e della distribuzione delle acque sul globo.

Sommando forza centrifuga e forza di attrazione degli astri in una località si avrebbero sviluppi molto complessi della forza di marea; nelle formule entrerebbero in gioco le coordinate geografiche della località, il tempo medio o sidereo, i periodi astronomici con cui variano le coordinate di Sole e Luna, le coordinate degli astri.

Alla fine dello sviluppo si otterrebbero sviluppi in serie di seni e coseni dai quali si noterebbe che **il fenomeno è rappresentato matematicamente da più oscillazioni armoniche il cui periodo è funzione dei periodi astronomici di Sole e Luna.**

La forza di marea verrebbe cioè scomposta in tante forze periodiche ciascuna dovuta all'azione di un “astro fittizio” animato da un moto circolare che si compie sul piano dell'equatore con velocità costante intorno al centro della Terra.

Gli astri fittizi derivano dalla scomposizione del complesso, ma ben conosciuto, moto di Luna e Sole.

La curva di marea reale non è altro che la somma di componenti armoniche di periodo noto (deducibile dai periodi o velocità angolari dei movimenti di Sole e Luna) e aventi ampiezza e fase legate alle caratteristiche locali.

Ampiezza e fase, che si indicano rispettivamente con H e g , sono dette costanti armoniche.

Movimenti assoluti	Movimenti relativi principali
<ul style="list-style-type: none"> ● rotazione della Terra attorno al suo asse rispetto alle stelle fisse (giorno sidereo): periodo di 23,9345 ore (vel. angolare $15,0411^\circ/\text{ora}$) 	<ul style="list-style-type: none"> ● movimento del Sole rispetto un punto della Terra: periodo 1 giorno solare medio cioè 24,00 ore (velocità angolare $15,0000^\circ/\text{ora}$)
<ul style="list-style-type: none"> ● rivoluzione della Luna intorno alla Terra (mese tropico, coincidente col periodo della declinazione lunare): periodo 27,3216 giorni (velocità angolare $0,5490^\circ/\text{ora}$) 	<ul style="list-style-type: none"> ● movimento della Luna rispetto un punto della Terra: periodo 1 giorno lunare cioè 24,8412 ore (velocità angolare $14,4921^\circ/\text{ora}$)
<ul style="list-style-type: none"> ● rivoluzione della Terra attorno al Sole (anno tropico) periodo 365,2422 giorni (velocità angolare $0,0411^\circ/\text{ora}$) 	<ul style="list-style-type: none"> ● movimento della Luna nella sua orbita rispetto al moto dell'asse dell'orbita: periodo un mese anomalistico cioè 27,5546 giorni (velocità angolare $0,5444^\circ/\text{ora}$)
<ul style="list-style-type: none"> ● rivoluzione dell'asse dell'orbita lunare attorno alla Terra; periodo 8,85 anni (velocità angolare $0,0046^\circ/\text{ora}$) 	<ul style="list-style-type: none"> ● movimento della Luna rispetto al Sole visto dalla Terra: periodo un mese sinodico cioè 29,5300 giorni (vel. angolare $=0,5079^\circ/\text{ora}$)
<ul style="list-style-type: none"> ● ciclo delle declinazioni lunari: oscillazione del piano dell'orbita lunare rispetto al piano dell'orbita terrestre: periodo 18,61 anni (velocità angolare $0,00022^\circ/\text{ora}$) 	

In tutte le località della superficie terrestre **le componenti armoniche conservano inalterato il proprio periodo** (cioè mantengono inalterata la velocità angolare) mentre, da località a località, **cambiano le costanti armoniche (ampiezza e fase)**.

Dallo studio della forza di marea si ricava che **possono esserci fino a 400 componenti armoniche**. In realtà se ne usa un numero notevolmente inferiore.

Si distinguono in:

- *principali*: esprimono l'azione che il sole e la luna eserciterebbero sulla marea se si muovessero sull'equatore mantenendosi a distanza media costante dalla Terra
- *secondarie*: esprimono gli effetti delle variazioni di declinazione (*onde declinazionali*), di parallasse (*onde ellittiche o anomalistiche*) e di altre particolarità dei moti di Luna e Sole che possono considerarsi come delle correzioni alle onde principali e che hanno assai minore importanza.

Ogni componente armonica è contraddistinta da una lettera che indica l'astro fittizio (o satellite) cui si riferisce e da un pedice numerico che la qualifica. La lettera M (*moon*) è usata per le componenti lunari e la lettera S (*sun*) per quelle solari; il pedice 1 per le componenti diurne, il 2 per quelle semidiurne, il 4 per le quartodiurne etc.

Per ricavare le costanti armoniche si dovrà:

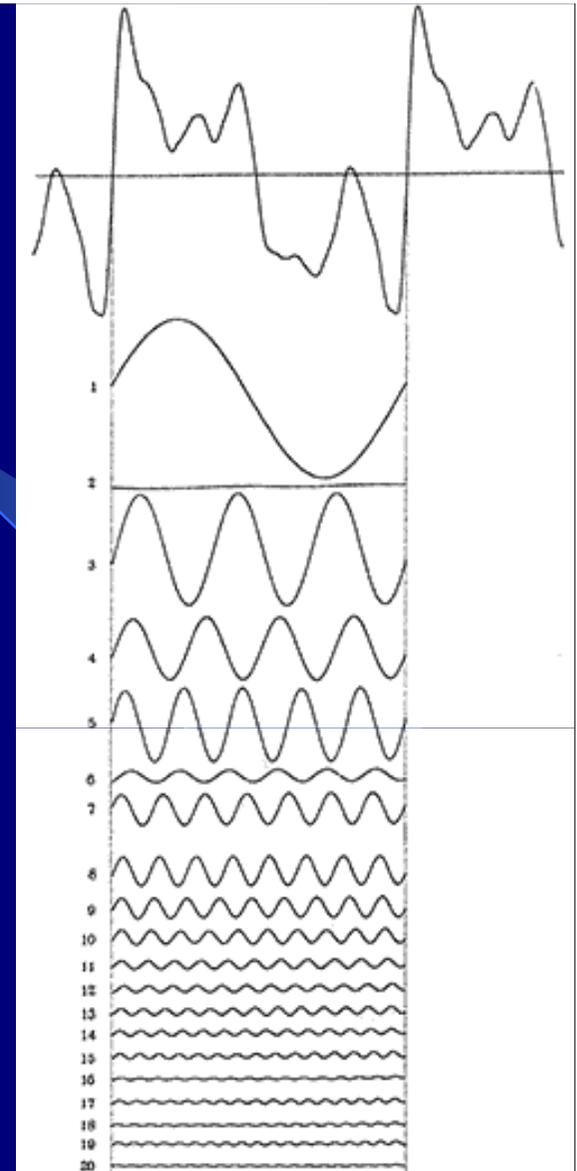
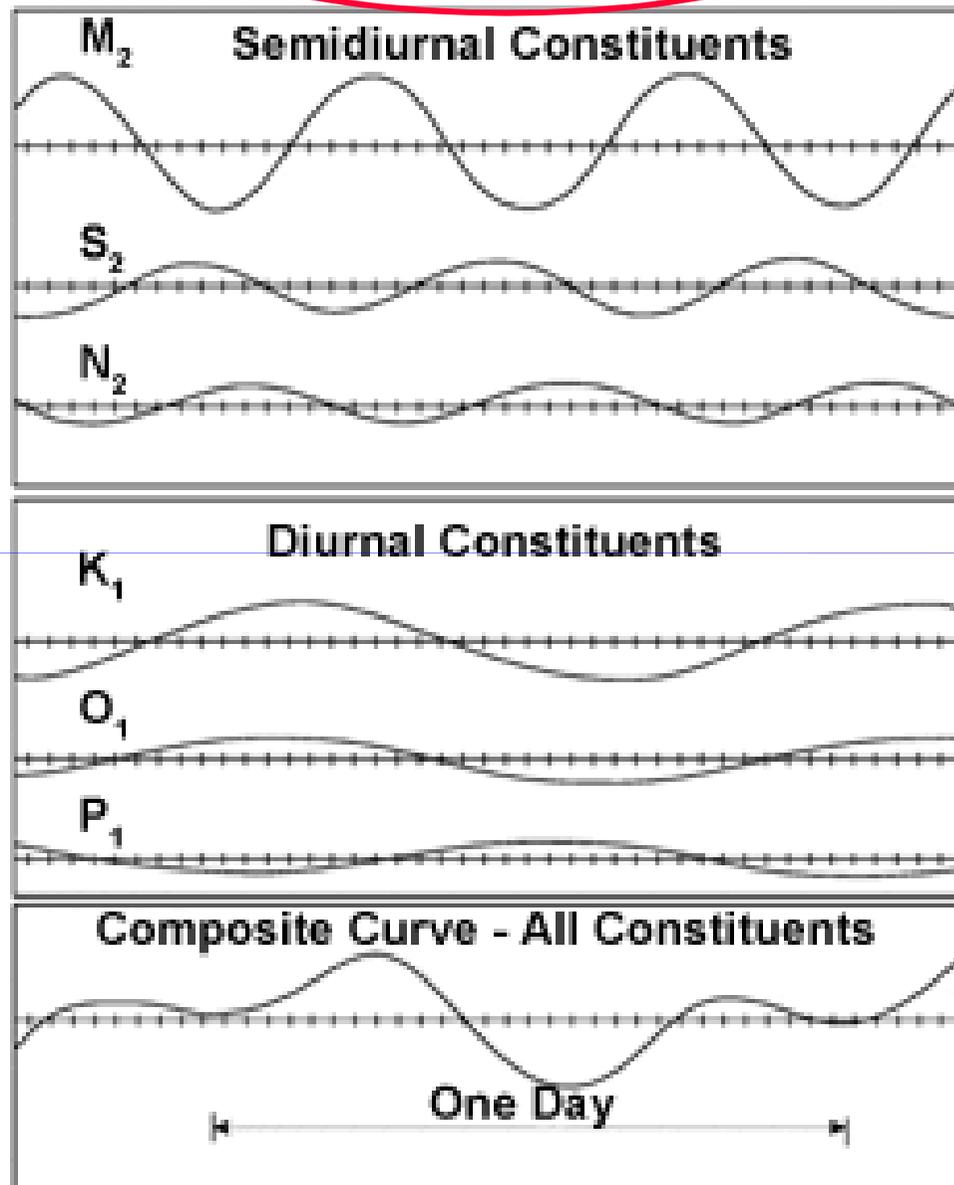
- i. registrare il livello marino per un certo tempo (tanto più lungo quanto maggiore è il numero di componenti armoniche che si vuole ricavare)
- ii. sottoporre questi dati ad opportuni metodi di filtraggio matematico (facilitato dal fatto che i periodi che si vogliono ricercare sono noti) che permettono di stabilire le costanti armoniche di ciascuna componente.

La marea in una località sarà esprimibile come:

$$H_{tot} = \sum_{i=1}^n H_i \cos(\nu_i t - g_i) + z_0$$

dove: H_{tot} è l'altezza del livello del mare rispetto al riferimento nell'istante t
 H_i è l'ampiezza della componente armonica
 ν_i è la velocità angolare oraria dell'astro fittizio
 g_i è la fase della componente armonica
 z_0 è il livello medio del mare.

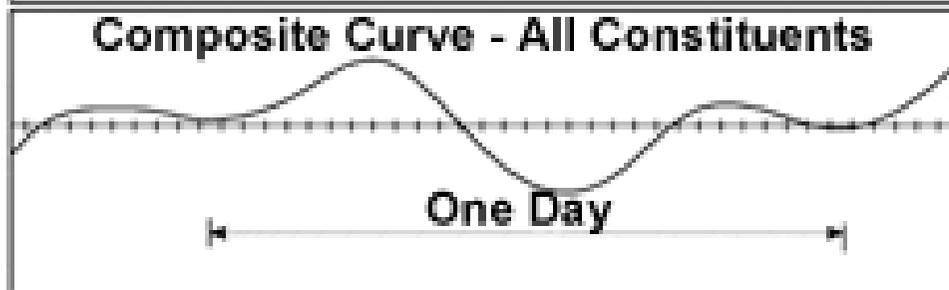
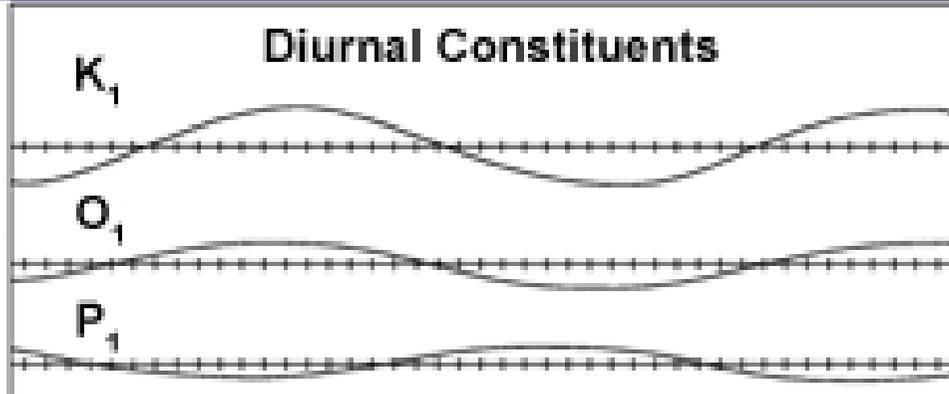
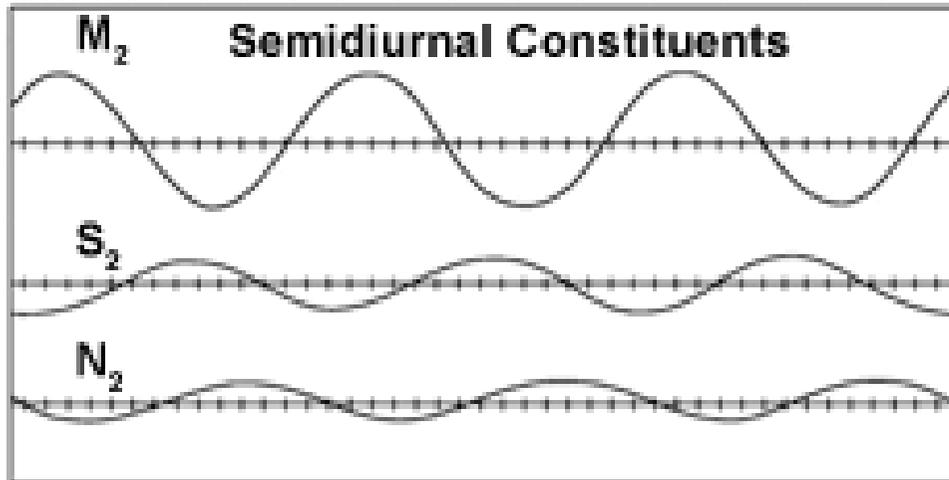
TIDAL PREDICTIONS



scomposizione in armoniche di una curva di marea

scomposizione in armoniche del suono di un clarinetto (20 armoniche)

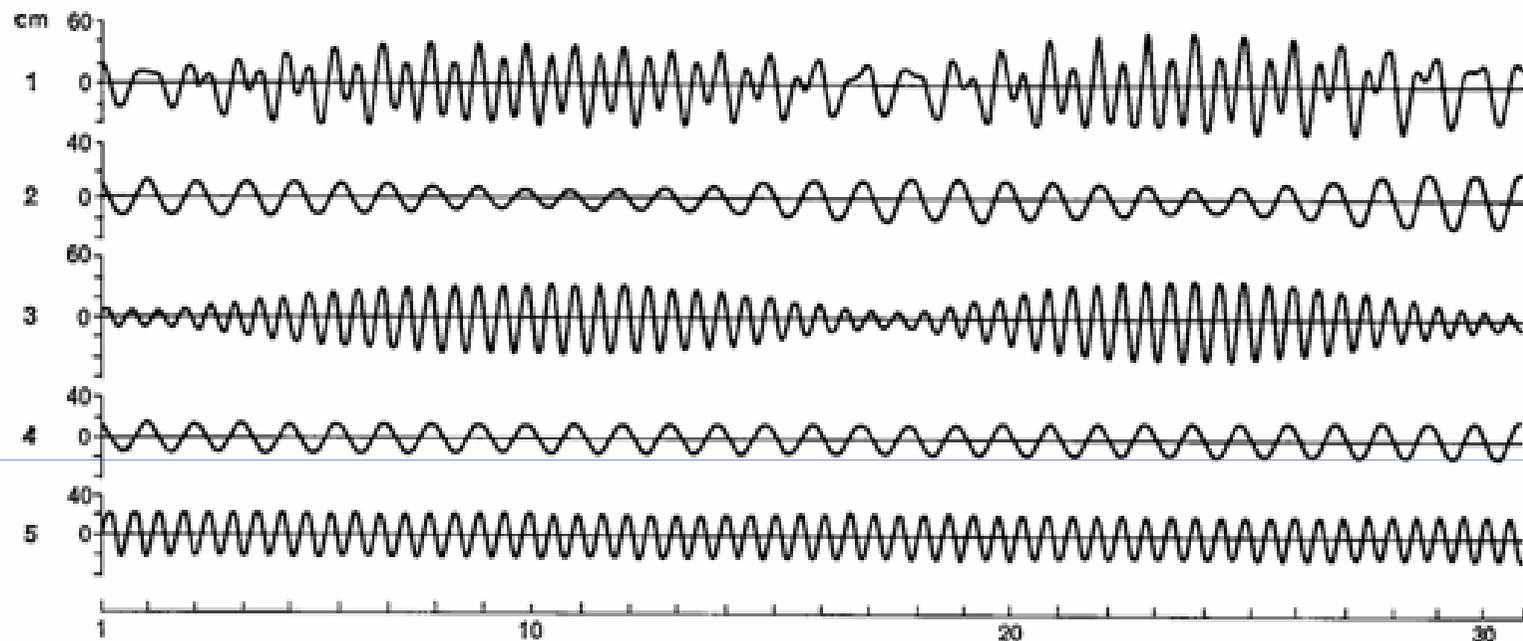
TIDAL PREDICTIONS



<p>Lunare semidiurna principale</p> <p>Questa componente consente di calcolare il contributo fornito dalla marea effettiva da una luna teorica che percorre un'orbita circolare intorno alla terra alla velocità media della luna vera, ad una distanza intermedia fra il perigeo e l'apogeo, giacendo sul piano dell'equatore</p>	<p>28,9842</p> <p>M_2</p>
<p>Solare semidiurna principale</p> <p>Questa componente consente di calcolare il contributo fornito alla marea effettiva da un sole teorico che nel suo moto apparente descrive una orbita circolare intorno alla terra, alla velocità media del sole vero, ad una distanza intermedia fra l'apogeo ed il perigeo, giacendo sul piano dell'equatore</p>	<p>30,0000</p> <p>S_2</p>
<p>Lunare ellittica maggiore semidiurna</p> <p>Questa componente tiene conto del fatto che la luna reale si muove in una orbita ellittica. Agisce in congiunzione con M_2 al perigeo ed in opposizione all'apogeo.</p>	<p>28,4347</p> <p>N_2</p>

<p>Lunisolare declinazionale diurna</p> <p>Questa componente tiene conto di parte delle variazioni di declinazione della luna e del sole</p>	<p>15,0411</p> <p>K_1</p>
<p>Lunare declinazionale diurna</p> <p>Questa componente tiene conto della rimanente parte della variazione della declinazione della luna</p>	<p>13,9431</p> <p>O_1</p>
<p>Solare declinazionale diurna</p> <p>Questa componente tiene conto della rimanente parte della variazione di declinazione del sole</p>	<p>14,9589</p> <p>P_1</p>

Velocità angolari



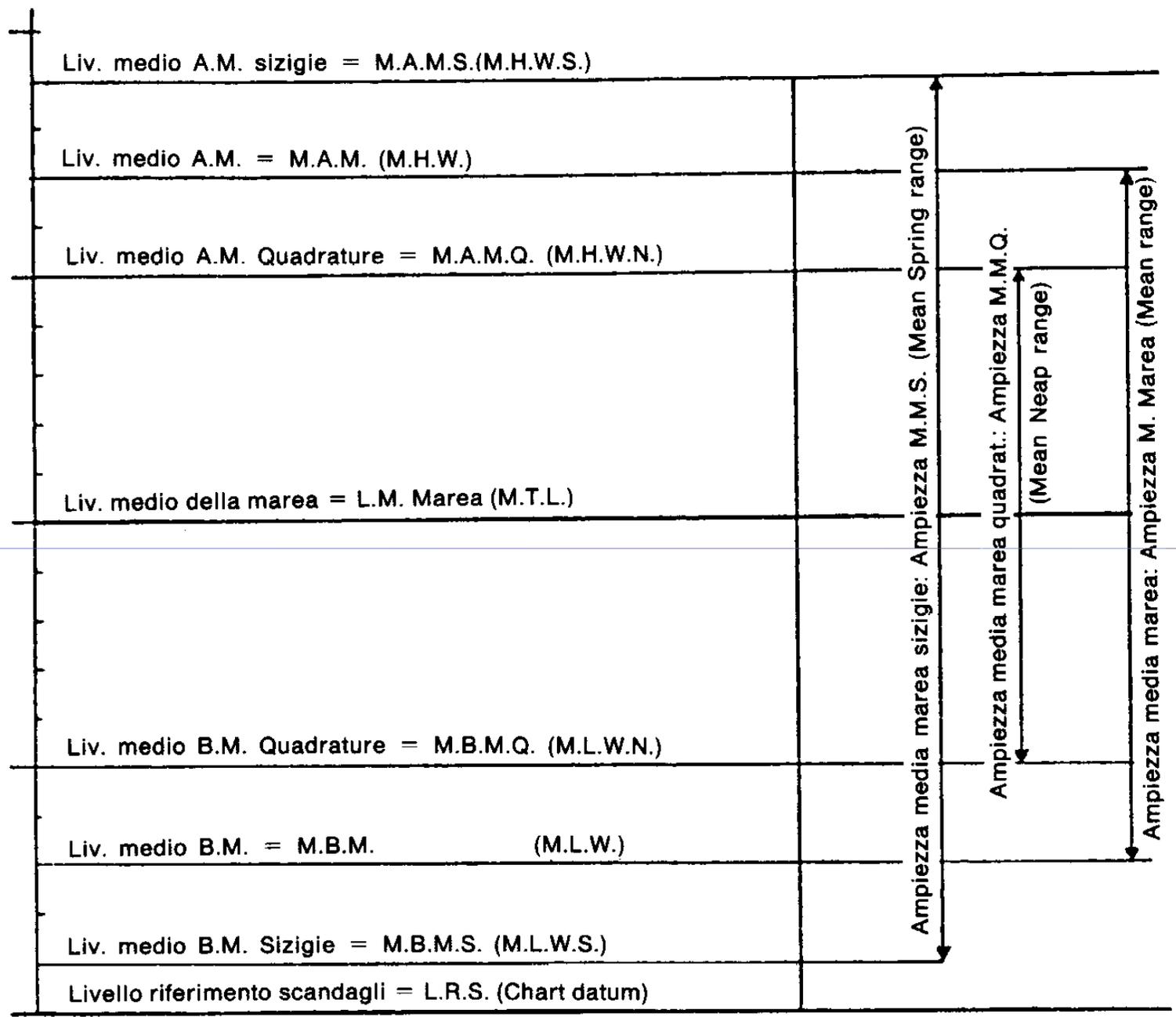
Complesso
diurno

Complesso
semidiurno

K_1

M_2

Sviluppo di alcune componenti armoniche della marea: Venezia, aprile 1967.
1, marea astronomica depurata da ogni altra variazione di livello; 2, complesso diurno; 3, complesso semidiurno; 4, componente armonica K_1 ; 5, componente armonica M_2 . Mentre le componenti armoniche quali K_1 e M_2 sono sinusoidi perfette, il gruppo diurno e semidiurno presentano sensibili variazioni di ampiezza nel corso del mese.



Le “Tavole di Marea dell'Istituto Idrografico” contengono le previsioni di marea per i seguenti porti del Mar Mediterraneo e Mar Rosso:

- 15 porti principali italiani
- 3 porti campione (Gibilterra, Venezia e Suez)
- 143 porti secondari

Le Admiralty Tide Tables, in tre volumi, contengono le previsioni di marea per località situate in tutto il globo; in particolare:

- 240 porti campione
- circa 8.000 porti secondari

Porto campione (*standard port*): le previsioni di marea in queste località vengono impiegate anche per la previsione in porti cosiddetti *secondari* che hanno un andamento di marea simile; quest'ultimo termine non significa che la località in questione è di secondaria importanza, ma che, per esigenze di spazio, si è ritenuto opportuno non riportarli come porti campione. Alcuni porti secondari delle I.I. 3133 e delle A.T.T. sono porti campione nelle tavole di marea edite da altre nazioni.

Porto principale significa che la previsione non viene utilizzata anche per la previsione in porti secondari.

Sia per i porti campione (*standard*) che per quelli principali vengono riportate per tutti i giorni dell'anno gli istanti e le altezze delle alte e basse maree.

I metodi di previsione impiegati sono:

- *armonico*
- *delle differenze di tempo e altezza*, valido per porti dove le maree hanno carattere diurno o semidiurno
- *armonico semplificato*

In effetti in alcuni porti delle Admiralty Tide Tables (A.T.T.) l'Ammiragliato utilizza previsioni di marea fornite da altri Istituti Idrografici (vedi *Table V* delle A.T.T.) che utilizzano metodi differenti: ad esempio per il porto di Brest viene utilizzato il metodo di Laplace, mentre per alcuni porti tedeschi viene utilizzato il metodo non armonico.