

# La Misura del Mondo

## 2 – Le dimensioni della Terra

Bruno Marano

Dipartimento di Astronomia

Università di Bologna

Una immagine della Terra dalla  
Stazione Spaziale (NASA-ESA)

Oggi osserviamo  
direttamente la forma  
della Terra



NASA

# La forma e le dimensioni della terra

L'idea che la terra sia sferica, sulla base di argomenti astronomici, risale agli inizi della cultura greca classica.

Una storiografia distorta ha creato la leggenda che fino al XV secolo fosse dominante l'idea che la Terra fosse piatta, idea contro cui Cristoforo Colombo avrebbe combattuto anche in ambiente colto (p.e. con i dotti incaricati di valutare la fattibilità del suo progetto, riuniti a Salamanca).

In realtà l'idea che la terra sia sferica fu già espressa da Anassimandro (600aC) e Pitagora (520 aC).

Aristotele (~350 aC) scrive:

“Nelle eclissi il bordo è sempre curvo e, poiché è l'interposizione della terra che produce l'eclisse, la forma di quella linea sarà prodotta dalla forma della superficie della terra, che è quindi sferica.”

*(un secondo argomento astronomico segue nello stesso passo )*

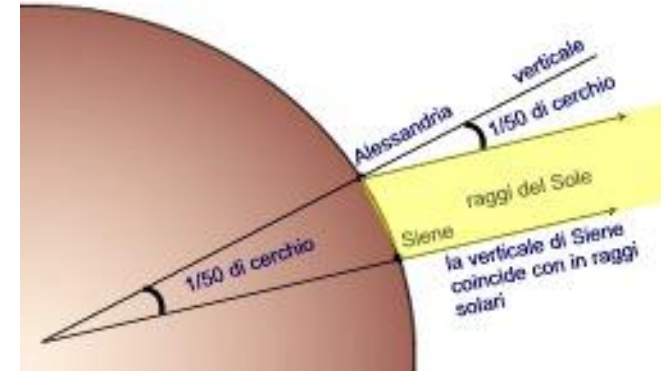
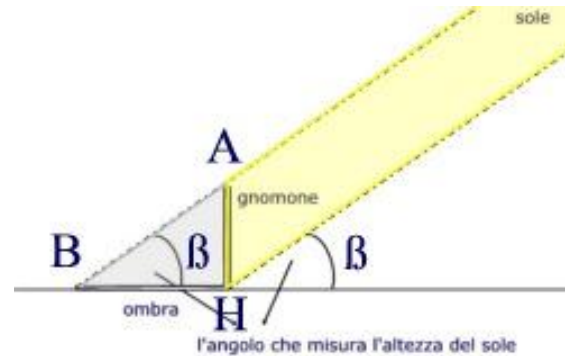


# Aristotele (~350 aC): De Coelo, libro III

“Ancora, l’osservazione delle stelle rende evidente non solo che essa è sferica, ma anche che non è di grandi dimensioni. Infatti un piccolo cambiamento di posizione verso sud o nord provoca una manifesta alterazione dell’orizzonte. Intendo che c’è un grande cambiamento nelle stelle che abbiamo sopra di noi: le stelle sono viste in posizioni differenti, muovendosi a sud e a nord. Inoltre ci sono stelle visibili in Egitto o vicino a Cipro, che non sono viste nelle regioni settentrionali, e stelle, sempre visibili nel Nord, che nelle regioni meridionali sorgono e tramontano. Tutto ciò va nel senso di mostrare non solo che la terra è di forma circolare, ma anche che è una sfera di non grandi dimensioni; senno l’effetto di un piccolo cambio in posizione non sarebbe così evidente. Quindi non è così incredibile ciò che alcuni affermano, che vi sia continuità tra le colonne d’Ercole e l’India e che **via sia un unico Oceano.**”



# La prima misura delle dimensioni della Terra: Eratostene(240 aC)



Eratostene, bibliotecario di Alessandria, sapeva che il giorno del Solstizio a Siene, a Sud di Alessandria, il Sole culminava esattamente allo Zenith (lo si vedeva dal fondo dei pozzi). Ad Alessandria al Solstizio l'altezza  $\beta$  del Sole, misurata con uno gnomone, dava una distanza zenitale ( $90^\circ - \beta$ ) pari a  $1/50$  di angolo giro ( $\sim 7,2^\circ$ ). Se si accetta che il Sole sia molto distante, essa corrisponde all'angolo che ha per vertice il centro della Terra e i cui lati passano per Siene e Alessandria. La distanza "effettiva" tra le due città (valutata 5.000 stadi) è dunque un  $1/50$  della circonferenza terrestre, che risulta quindi di 250000 stadi. E' la prima misura scientifica delle dimensioni della terra.

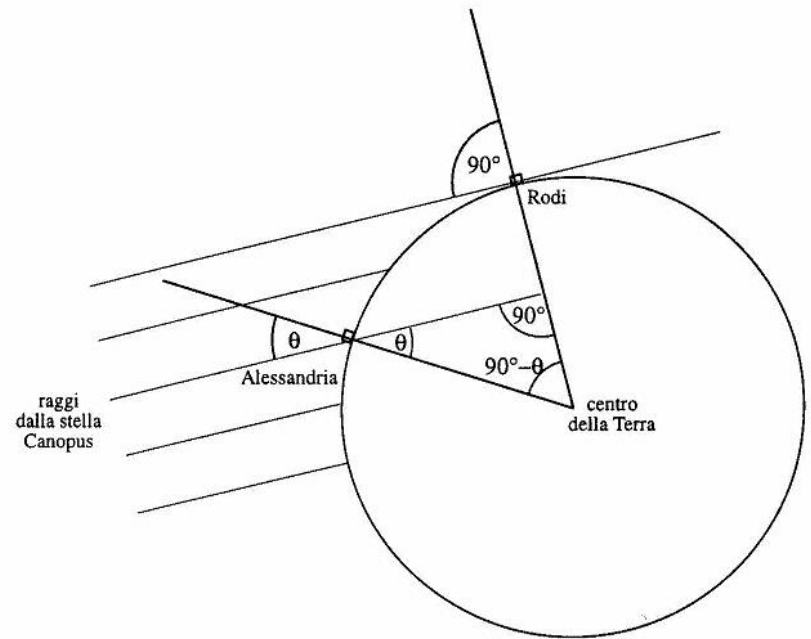
# Quanto è affidabile la misura di Eratostene?

La questione è oggetto di dibattito da parte degli storici della scienza:

- A quel tempo la misura di grandi distanze, pur effettuata “professionalmente”, era sicuramente molto imprecisa. E’ ragionevole che questo induca un errore piuttosto grande nel risultato di Eratostene .
- Lo “stadio” greco non era unico, la sua lunghezza variava da 150 a 215 metri. Si crede che lo stadio usato da Eratostene corrispondesse a 185 metri attuali: ne risulterebbe così una circonferenza terrestre di 46.250 km: un dato che, benché superi di oltre 6.000 km il valore reale, sarebbe comunque eccellente, data l'imprecisione degli strumenti utilizzati e dei dati di base.
- Secondo alcuni storici della scienza, Eratostene arrivò molto più vicino al vero: lo stadio doveva essere lungo 157,5 metri e quindi la circonferenza ottenuta da lui corrisponderebbe a 39.690 km, vicinissimo al valore reale di 40.000Km. E’ un dato “troppo” vicino al reale per non indurre il sospetto che la conclusione derivi da una scelta ad hoc del valore dello stadio.
- Va tenuto presente che la stima si basa su “numeri tondi” (5000 stadi, 1/50 di circonferenza) riportati da fonti successive, che suggeriscono una precisione relativamente limitata. Tuttavia è dibattuto se questi fossero i valori effettivi ottenuti da Eratostene, o se ci sia stata un successivo arrotondamento ad uso “scolastico”.

# Un metodo “sbagliato” (Posidonio ~100 aC)

Si basa sul fatto che la stella Canopo sfiora l'orizzonte a Rodi, mentre è ben visibile a Alessandria. La misura di  $\theta$  appare perfezionare il metodo di Eratostene, ma la rifrazione atmosferica la altera, portando il valore osservato da  $5^{\circ}15'$  (vero) a  $7^{\circ}30'$ . (Posidonio non poteva saperlo). Ottenne un valore di 28000 Km, ben inferiore al vero ma creduto più accettabile. Adottato da Tolomeo, esso fu trasmesso attraverso il Medioevo con l'Almagesto.



Ciò, assieme a un sopravvalutazione dell'estensione dell'“Ecumene” in longitudine, influenzò verosimilmente Cristoforo Colombo riguardo alla possibilità di “raggiungere l'Oriente per Occidente”

# Ipparco, Marino di Tiro, Tolomeo

• **Ipparco** fu il massimo astronomo dell'antichità: costruì il primo catalogo di stelle, determinandone le posizioni e applicò per primo metodi, come quello della parallasse, ripresi poi dall'astronomia moderna.

• **Marino di Tiro** (II secolo d.C.) seguendo le indicazioni di Ipparco introdusse per primo la misura delle latitudini e longitudini in gradi d'arco sessagesimale, eliminando quindi l'incertezza nelle misure legata alle diverse unità di misura utilizzate. Definì inoltre la prima proiezione cartografica (cilindrica equidistante), che fu poi ripresa da Tolomeo.

• **Claudio Tolomeo** (90-162 d.C.), astronomo, geografo e matematico d'Alessandria d'Egitto, compilò due opere fondamentali:

- la Geografia

- l'Astronomia (denominata **Almagesto**, “il massimo“ )

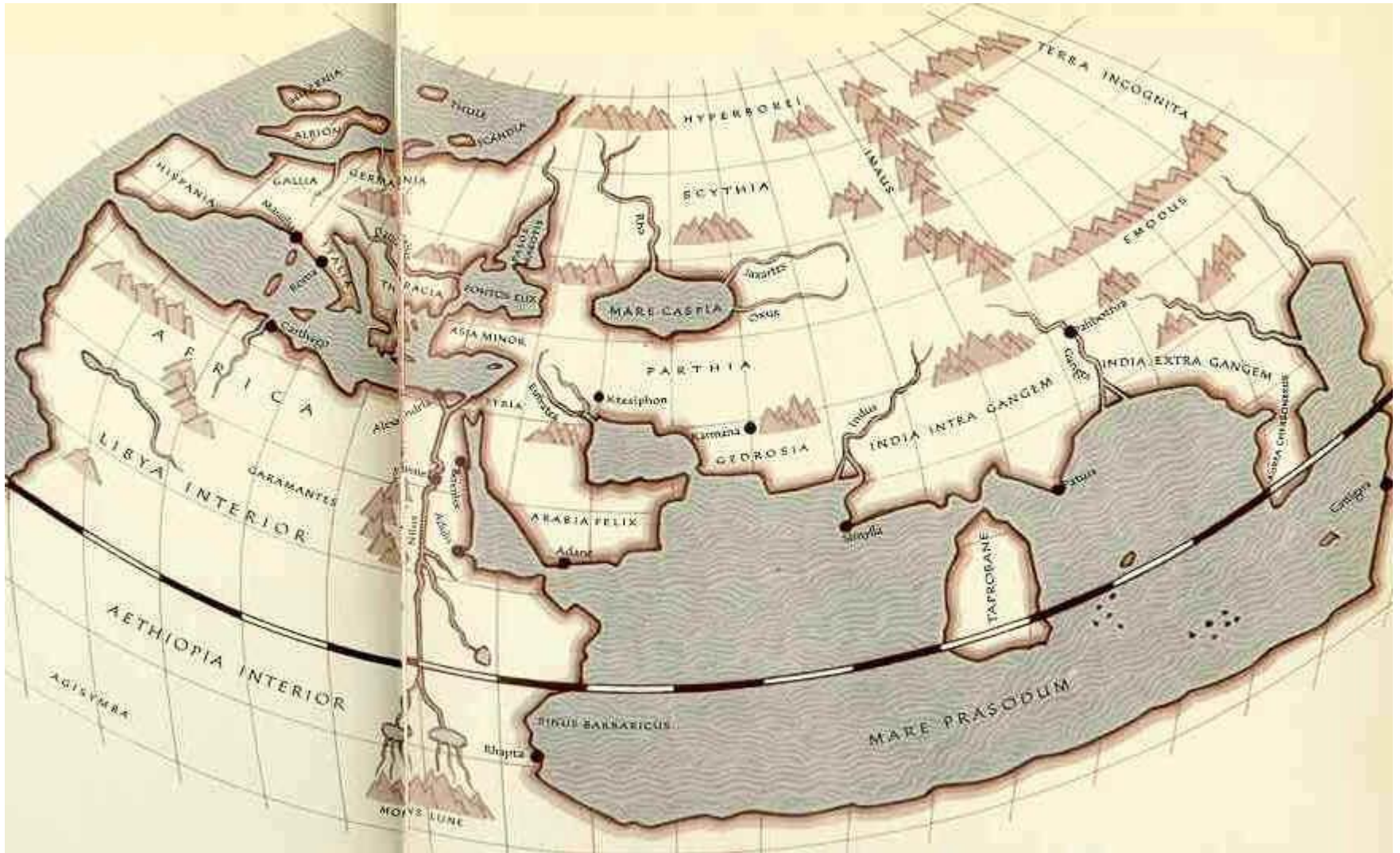
La Geografia e Astronomia di Tolomeo, conosciute dagli Arabi, vennero introdotte nel mondo della cultura europea nel secolo XII dall'arabo al Idrisi. Esse furono il punto di partenza della rinascita dell'astronomia europea.



# La Carta dell'Ecumene di Tolomeo

- Rappresenta la sintesi delle conoscenze geografiche dell'antichità classica
- L'originale è perduto, se ne conoscono molte riproduzioni successive
- Si possono notare, oltre ad una precisa descrizione dell'area mediterranea, della costa atlantica e del vicino oriente: la conoscenza dei laghi centroafricani, nell'alto Nilo, oltre l'equatore; la conoscenza delle catene montuose asiatiche, della penisola di Malacca, del golfo del Siam, dell'isola di Ceylon, pur tracciata molto più estesa del reale (*fate il confronto con una carta fisica moderna*).
- L'Oceano Indiano appare come un mare chiuso: ciò forse deriva dalla moderata ampiezza delle sue maree, rispetto a quelle atlantiche, che lo facevano ritenere mare simile al Mediterraneo, e non collegato all'Oceano. Tolomeo non dette fede ad Erodoto che riferiva della avvenuta circumnavigazione dell'Africa da parte dei Fenici.
- L'Estremo Oriente è indicato come “terra incognita”

# Riproduzione della Carta di Tolomeo



Bruno Marano  
La Misura del Mondo 2

# Altra riproduzione della Carta di Tolomeo



Bruno Marano  
La Misura del Mondo 2

# Il Giappone (Zipangu) nel Milione di Marco Polo (1298)

**Zipangu è una isola in levante, ch'è ne l'alto mare 1.500 miglia.** Qui si truova l'oro, però n'anno assai.. ...Troppo è di grande valuta ill'oro, e l'altre care cose che vi sono, ma sono sí di lungi ch'a pena vi si uò andare. E le navi di Quinsai e del Zaiton, quando vi vanno, ne recano grande guadagno, e penanvi ad andare un anno, ché vanno il verno e tornano la state. **Quini non à se non due venti, l'uno che mena in là e l'altro in qua; e questi due venti l'uno è di verno e l'altro è di state.** Ed è questa contrada molto di lungi d'India, e questo mare è bene del mare Ozeano, ma chiamasi de Cin, sí come si dice lo mare d'Inghilterra o quel de Rocella; **e l'mare d'India ancora è del mare Ozeano.** Di quelle isole non vi conterà più, **perochè non vi sono stato.**

Quindi Marco Polo riferisce:

- che il mare d'India non è chiuso, ma connesso all'Oceano.
- dell'esistenza dei Monsoni ("due venti, uno mena in là e l'altro in qua")
- dell'esistenza del Giappone "1500 miglia" a Est della Cina.

Il geografo **Toscanelli** recepì le informazioni in una sua famosa carta del 1457, nota a Cristoforo Colombo.

# La mappa di Toscanelli (1457)

(registra la presenza del Giappone a Est della Cina)



Bruno Marano  
La Misura del Mondo 2

# L'estensione del mondo ignoto ai tempi di Colombo

Toscanelli valutava in 130 gradi la distanza tra Lisbona e la costa orientale dell'Asia, seguendo la via dell'Occidente. Valutava in 230 gradi la distanza per la via dell'Oriente, cioè attraverso il “mondo noto”. La spiegazione più plausibile è la sopravvalutazione, basata sul testo di M.Polo, della distanza del Giappone dalla Cina, associata ad una sottostima della circonferenza della terra.

	Eratostene	Strabone	Marino di T.	Tolomeo	Toscanelli
<b>Ampiezza della terra nota</b>	<b>77800 stadi</b>	<b>70000 st</b>	<b>225 gradi</b>	<b>180 gr</b>	<b>230 gr</b>
<b>Ampiezza della terra ignota</b>	<b>174200 st</b>	<b>182000 st</b>	<b>135 gr</b>	<b>180 gr</b>	<b>130 gr</b>
<b>Ampiezza della terra</b>	<b>252000 st</b>	<b>252000 st</b>	<b>360 gr</b>	<b>360 gr</b>	<b>360 gr</b> <b>Φ=33000 Km</b>

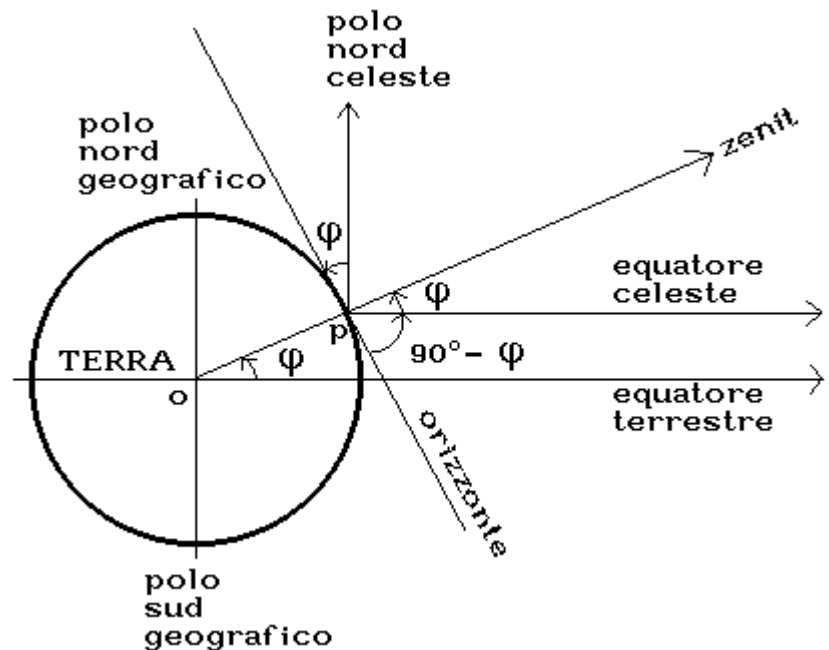
In realtà Lisbona ha Longitudine 9°W e Tokyo 140° E. La terra “nota” si estende per 150°. L'ampiezza della “terra ignota” è di 210°. La circonferenza della Terra è di 40000 Km. Colombo sposò le tesi più favorevoli dell'epoca. Per «*buscar el levante por el poniente*» avrebbe dovuto percorrere circa 20000 Km, anziché i 5000-6000 dei suoi calcoli. Senza l'America nel mezzo avrebbe fallito.



# La misura delle latitudini e longitudini: la Latitudine

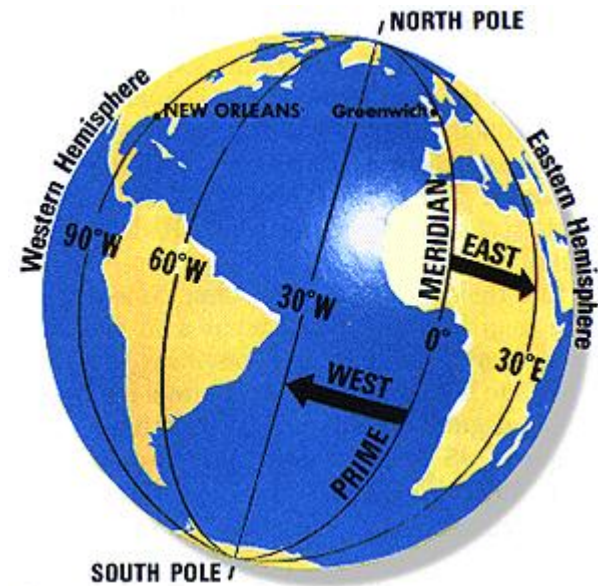
La misura delle latitudini si basa sulla misura dell'altezza delle stelle:

Il metodo è stato applicato per secoli alla misura della posizione: caso semplificato (concettuale) è dato dalla misura dell'altezza sull'orizzonte della Stella Polare ( $\varphi$ )



# La misura delle longitudini...

- Con la rotazione della terra, ogni meridiano passa davanti al sole, che ha la massima altezza a mezzogiorno lungo l'intero meridiano. Un orologio accordato sul mezzogiorno ad un certo meridiano, misurerà la longitudine di un altro luogo come differenza in tempo tra il transito "reale" del sole al meridiano e il mezzogiorno dell'orologio. Un'ora di differenza corrisponde a 15 gradi, un grado a 4 minuti.
- Ma come mantenere "a punto" l'orologio? E' stata per lungo tempo un'impresa disperata.



# “The Difficulty of Determining Longitude”

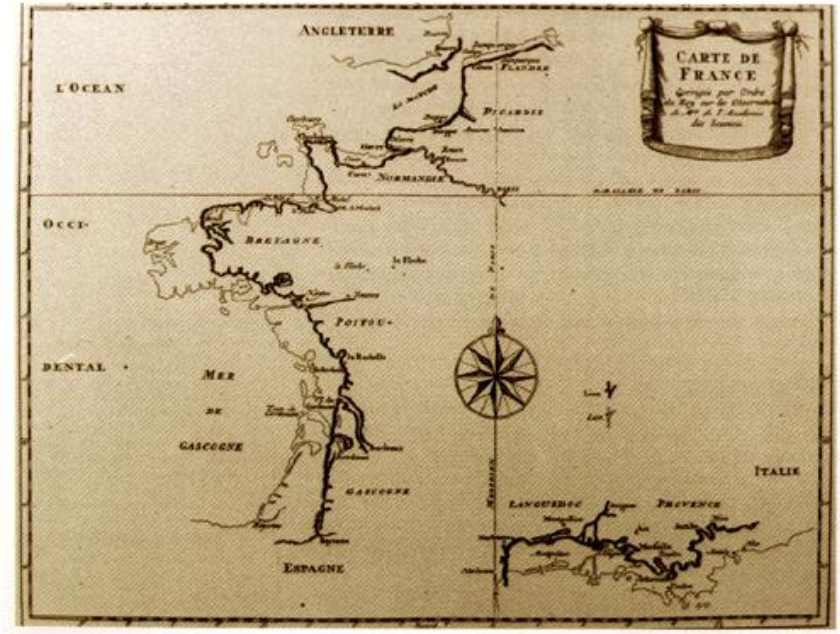
“I should then see the discovery of the longitude, the perpetual motion, the universal medicine, and many other great inventions, brought to the utmost perfection” (J. Swift, *I viaggi di Gulliver*)

L'accostamento, nella descrizione di un incredibile paese della perfezione, mostra la fama di insolubilità del problema ancora all'inizio del '700.

La determinazione della longitudine fu un problema molto difficile da risolvere. Il punto è che la latitudine è misurata verso N o S ed è quindi indipendente dalla rotazione della terra, mentre la determinazione della longitudine è influenzata da essa. La latitudine può essere determinata con sole misure angolari – per esempio la posizione della polare o l'altezza del Sole a mezzogiorno. Per la longitudine è richiesta la conoscenza del tempo in un luogo di riferimento. Se un marinaio ha un orologio che segna il tempo di Greenwich e trova che esso segna le 14 quando il Sole ha l'altezza massima sull'orizzonte (le 12 solari locali), egli saprà che la sua longitudine è due ore (30 gradi) ad W rispetto a Greenwich. Il problema, prima del XVIII secolo, era quello di avere un orologio che mantenesse la precisione necessaria in lunghi viaggi, in terra o mare. I migliori orologi erano quelli a pendolo, che non potevano funzionare sulle navi di allora, mentre quelli a molla erano inaffidabili su tempi di settimane, quanto durava un viaggio in nave.

# Le longitudini (continua)

- La carta a fianco confronta i contorni della Francia ottenuti prima e dopo l'introduzione dell'uso dei satelliti di Giove per registrare gli orologi (Cassini). Il re di Francia affermò che gli astronomi gli avevano sottratto più terra di una guerra perduta.
- Il primo orologio in grado di funzionare correttamente su una nave fu costruito da J.Harrison alla metà del XVIII secolo. Era basato su molle e non sul pendolo. Aveva una precisione dell'ordine di un secondo al mese.
- Una lettura interessante: U.Eco – *L'isola del giorno prima*. Bompiani

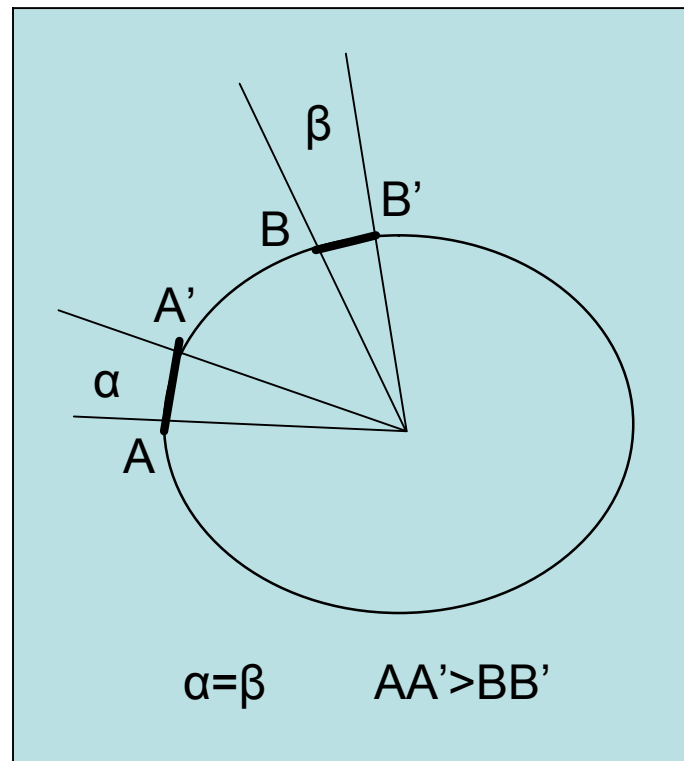


# Misure geodetiche: raggio e forma della Terra

Dal XVIII secolo ad oggi le dimensioni della Terra sono state definite con precisione crescente. L'Accademia delle Scienze di Francia organizzò, nel 1735, due spedizioni: P.L. Maupertuis fu inviato in Lapponia e P. Bouguer in Ecuador, con l'incarico di misurare la distanza lineare tra due punti posti lungo il meridiano con differenza in latitudine di  $1^\circ$ . Risultò che la terra è "oblata" (schiacciata ai Poli), con uno schiacciamento di  $1/230$ . La meccanica di Newton prevedeva questo fatto, come effetto della rotazione terrestre.

Misure recenti, basate su diverse tecniche (satellite Lageos, interferometria VLBI, ...) hanno raffinato queste misure.

I valori ora adottati per la distanza tra il centro della Terra e la superficie di riferimento (Geoide) sono di **6357 km** al polo a **6378 km** all'equatore, con differenza  $\sim 1/300$ -

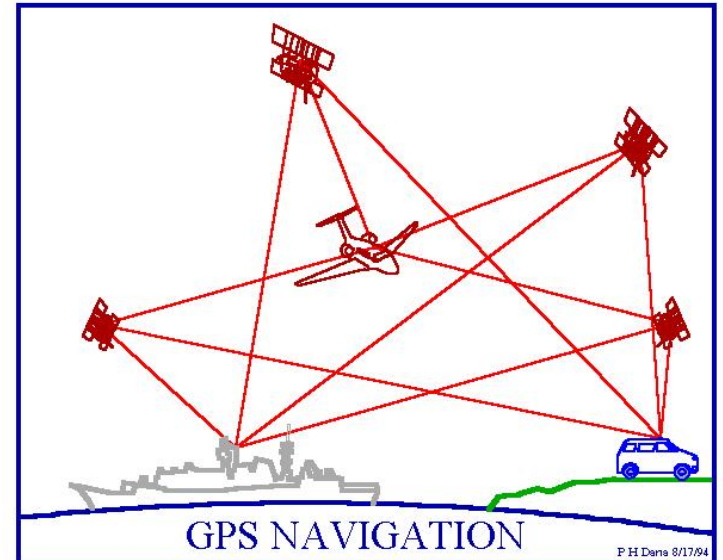
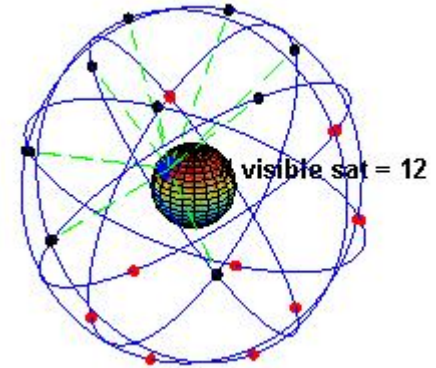


*(L'eccentricità è molto esagerata nella figura)*

# Il Global Positioning System (GPS)

- Oggi è possibile stabilire una posizione sulla Terra con una precisione di pochi metri tramite il GPS (*US Dept. of Defense*)
- Una “costellazione” di satelliti emette, secondo una sincronizzazione comune estremamente precisa, un segnale radio codificato .
- La posizione dei satelliti è controllata e nota con analogia alta precisione.
- Un punto sulla Terra rileva, in genere, il segnale di almeno sei satelliti.
- La codifica del segnale permette di misurare il ritardo  $\Delta t$  tra tempo di emissione e tempo di arrivo.
- La quantità  $c \cdot \Delta t$  ( $c$  è la velocità della luce) misura la distanza tra satellite e utente.

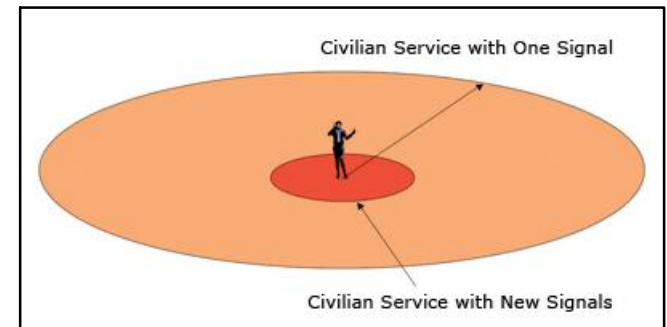
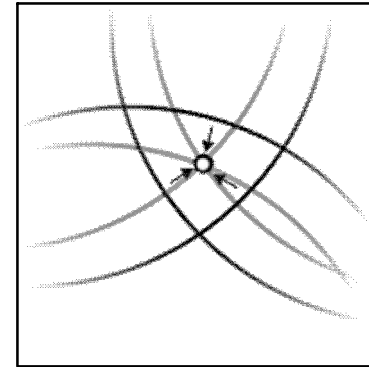
*segue*





# GPS: schema del metodo (“trilateration”)

- La distanza del punto da un satellite restringe la sua posizione ad una superficie sferica.
- Risulta da facile geometria che tre satelliti restringono, tramite la intersezione di tre sfere, la posizione a due punti, uno dei quali risulta irrealistico (di norma perché troppo lontano dalla Terra).
- Un errore in tempo di, per esempio, 0.001 sec. genererebbe un errore di 300Km.
- Un comune ricevitore civile, che deve essere di basso costo, non può avere un orologio con precisione sufficiente
- Lo posizione di un quarto satellite permette di correggere le imprecisioni dell’orologio del ricevente e “chiude” la misura (fig.1)
- La posizione risulta definita con una tolleranza tipica di 10 metri (fig.2)
- La codifica militare del segnale, non aperta all’uso civile, da’ precisioni di 30cm.



*Per saperne di più:*

[http://en.wikipedia.org/wiki/Global\\_Positioning\\_System](http://en.wikipedia.org/wiki/Global_Positioning_System)