

Michele Bianchi

**STORIA DELLA LONGITUDINE:
IL CONTRIBUTO DI GALILEO
ALLA SUA DETERMINAZIONE**



Edizioni il Frangente

Indice

| | |
|--|----|
| Introduzione | 5 |
| Relazione tra longitudine e angolo orario | 7 |
| I primi metodi per il calcolo della longitudine | 9 |
| Metodo dell'eclissi di Luna | 9 |
| Metodo delle distanze lunari | 10 |
| Metodo Whiston- Ditton | 13 |
| Il metodo di Galileo | 14 |
| Storia | 14 |
| I satelliti medicei | 18 |
| Risonanza orbitale | 20 |
| Fenomeni medicei | 21 |
| Calcolo della longitudine | 23 |
| Esempio pratico | 27 |
| Conclusione | 31 |
| Bibliografia | 32 |

INTRODUZIONE

Per stabilire la posizione di un punto sulla Terra sono necessarie due coordinate: la latitudine e la longitudine. Con un buon strumento che consenta la misurazione dell'altezza del Sole o della Stella Polare è possibile determinare, con relativa facilità, la prima di queste coordinate. Per determinare la longitudine occorre invece confrontare l'ora locale (dell'osservatore) con l'ora riferita ad un determinato meridiano. Tra il 1400 ed il 1700 si cercarono vari metodi per effettuare questo calcolo. Infatti, fino alla metà del XVIII secolo ancora non esisteva uno strumento, diverso dall'orologio solare o dall'orologio a sabbia, in grado di misurare il tempo a bordo delle navi. L'esigenza di trovare un metodo per determinare un corretto punto nave nacque con lo sviluppo dei traffici commerciali transoceanici; abbandonare la costa per periodi temporali prolungati aumentava esponenzialmente il rischio di perdere l'orientamento e rendeva la navigazione molto pericolosa; a ciò si aggiungeva il fatto che perdere o quanto meno ritardare l'arrivo di carichi preziosi causava spesso un danno economico non indifferente.¹

Diversi e tragici sinistri marittimi, che di seguito citeremo, spinsero il governo inglese a proporre un premio in denaro per chi avesse scoperto o ideato un metodo per calcolare la longitudine con una buona approssimazione. Nel Longitude Act del 1714 il parlamento inglese stanziò un premio di 20.000 sterline per incentivare questa ricerca.

L'approssimativa conoscenza della posizione costringeva le navi ad affollarsi su lunghe rotte, più sicure dal punto di vista della navigazione, ma che le esponevano a rischi di aggressione da parte di navi corsare. Sempre la mancanza del corretto dato di posizione

¹ Nel 1592, al largo delle Azzorre, venne affondato dagli inglesi un galeone portoghese, *Madre de Deus*, carico di monete d'oro e d'argento, perle, brillanti, cotone e quasi 500t di spezie. La perdita monetaria si aggirava intorno alla metà dell'intero gettito fiscale inglese dell'epoca (*Longitudine*, Dava Sobel, BUR, p. XVIII).

poteva allungare i viaggi in maniera non quantificabile a priori esponendo l'equipaggio anche al rischio dello scorbuto.²

Il 22 Ottobre 1707 quattro delle cinque navi da guerra della flotta inglese al comando dell'ammiraglio Sir Cloudisley Shovell affondarono in prossimità delle Isole Scilly.³ La prima nave a schiantarsi contro gli scogli fu proprio l'ammiraglia *HMS Association* seguita dalla *HMS Eagle* e *HMS Romney*. Morirono duemila uomini, solo due furono i superstiti di cui uno fu proprio l'ammiraglio Shovell.⁴

Nel 1741 l'ammiraglio George Anson,⁵ dopo molte settimane di mare, ebbe difficoltà a raggiungere l'isola di Juan Fernandez:⁶ sapeva che la sua nave si trovava alla latitudine dell'isola ma non sapeva se più a est o più a ovest. Fece rotta verso est, ma dopo qualche giorno incontrò le coste del Cile e dovette tornare indietro, verso ovest, prolungando il periodo di navigazione di altre due settimane. Ottanta membri del suo equipaggio morirono di scorbuto durante l'incerta navigazione, e più della metà quando, già ammalati, giunsero a terra.

I metodi proposti per risolvere il grande problema che affliggeva la società dell'epoca furono notevoli, dai più complicati, come il metodo delle distanze lunari, ai più originali come quello di Whiston-Ditton. In questo testo, dopo un breve cenno sui metodi più utilizzati, approfondiremo quello delle eclissi delle lune di Giove, ideato da Galileo Galilei. Sapere che uno scienziato come Galilei abbia saputo dare un contributo anche all'arte della navigazione credo che sia cosa gradita a tutti i naviganti. Egli infatti, insieme a Gian

² Detta anche malattia dei naviganti, lo scorbuto è dovuto alla mancanza di vitamina C nell'alimentazione, non è una malattia epidemica. I sintomi sono alterazione delle gengive, violacee e sanguinanti, ed emorragie varie (*Enciclopedia UTET*, vol. XVI, p. DCCCXCVI).

³ Arcipelago della Gran Bretagna, situato a 24Nm a SW del promontorio della Cornovaglia Lands'End. È composto da centoquaranta tra isole isolotti e scogli. Segnano il confine tra la Manica e l'oceano Atlantico (*Enciclopedia UTET*, vol. XVI, p. DCCCLXXIII).

⁴ Si racconta che l'ammiraglio Shovell, trovato naufrago sulla spiaggia, venne ucciso e derubato da una donna che confessò l'omicidio in punto di morte (*Longitudine*, Dava Sobel, BUR, p. XVI).

⁵ Ammiraglio inglese (1697-1762), entrato giovane in marina, divenne comandante nel 1724, fece il giro del mondo tra il 1740 e il 1744 (*Enciclopedia UTET*, vol. I, p. DCCLXXV).

⁶ Gruppo insulare dell'oceano pacifico situato a latitudine 33-34°S a circa 300 miglia nautiche dalla costa cilena. Formato da tre isole vulcaniche su una delle quali venne sbarcato, nel 1704, Alexander Selkirk, che per cinque anni visse in solitudine sull'isola. La sua avventura ha ispirato De Foe a scrivere il romanzo *Robinson Crusoe* (*Enciclopedia UTET*, vol. X, p. DCXXXVI).

Domenico Cassini, ha dato un contributo notevole alla risoluzione del problema della longitudine. Difetto del suo metodo fu la scarsa praticabilità a bordo delle navi, nonostante questo venne largamente utilizzato per determinare la longitudine di innumerevoli luoghi sulla terraferma.

Alla metà del 1700 il problema fu infine risolto da John Harrison,⁷ l'inventore del cronometro marino, uno strumento che permetteva di "portarsi" l'ora di Greenwich a bordo, anche per lunghi viaggi. Ma la sua invenzione fece fatica ad affermarsi, sia perché gli ufficiali si sentivano sminuiti nel ricavare la longitudine con un metodo così semplice, sia perché la comunità scientifica dell'epoca riteneva che la soluzione del problema sarebbe arrivata dall'astronomia piuttosto che da un orologio tipo quello di Harrison.

RELAZIONE TRA LONGITUDINE E ANGOLO ORARIO

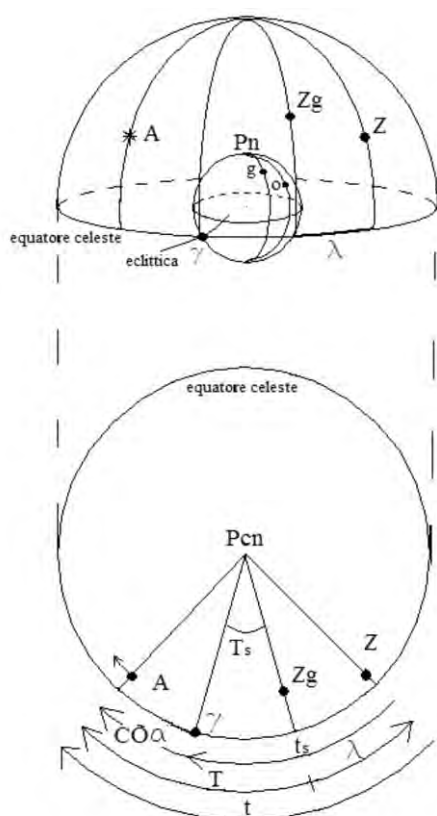


Fig. 1

Per capire la relazione tra longitudine ed angolo orario è necessaria una proiezione ortografica equatoriale della volta celeste, la figura è ottenuta proiettando, da un punto posto all'infinito sul prolungamento dell'asse terrestre, la volta celeste sul piano equatoriale. I raggi della circonferenza così ottenuta sono i meridiani celesti, Z_g è lo zenith dell'osservatorio di Greenwich(g), Z è lo zenith di un ipotetico osservatore, posto nel punto O , ad una certa longitudine da Greenwich ed A è un astro. È da notare che in questo tipo di raffigurazione, l'astro ed il punto vernale γ si muovono di moto

⁷Foulby, 24 marzo 1693 – Londra, 24 marzo 1776.

proprio ruotando in senso orario,⁸ per cui $CO\alpha$ è pressoché costante⁹ e a variare sono $t-T-t_s$ e T_s . Ad un certo istante quindi i due osservatori, posizionati uno a Greenwich e uno nel punto O, osservano lo stesso astro misurando però angoli orari diversi. La differenza tra i due angoli orari risulta essere uguale alla longitudine (λ) di O. La risoluzione del problema della longitudine risulta quindi molto semplice, il problema è che nel passato non esisteva modo di conoscere l'ora di Greenwich. Serviva infatti qualche evento astronomico rilevante, facile da osservare e prevedibile, di cui si conoscesse l'ora rispetto ad un determinato luogo di longitudine nota. Eclisse di Luna, di Sole e congiunzioni tra Luna e pianeti erano eventi preziosi ed utili per ricavare la longitudine. Supponiamo infatti di sapere che, ad un certo orario di Greenwich, l'astro A incorra in una particolare congiunzione, ad esempio con la Luna. L'angolo orario dell'astro A equivale a $T=T_s+CO\alpha$, dati facilmente ricavabili dalle effemeridi conoscendo l'ora di Greenwich in cui avviene il fenomeno, a questo punto basta ricavarsi, nel medesimo istante, l'angolo orario dell'astro (t) rispetto alla posizione di O. Il t è facilmente ricavabile con un metodo che descriveremo più avanti. Il passaggio finale consiste nella formula $\lambda=t-T$.

⁸ In realtà il moto apparente dell'astro e del punto d'ariete è conseguenza del moto di rotazione terrestre nel senso opposto.

⁹ Le coordinate uranografiche: declinazione (δ) e ascensione retta ($\alpha=360^\circ-CO\alpha$) subiscono delle infinitesime variazioni principalmente per due cause: la prima dipende dal moto proprio degli astri, difficilmente apprezzabile dalla Terra; la seconda dal moto di precessione degli equinozi, ovvero l'asse terrestre compie un moto lentissimo di periodo 26000 anni trascinando con sé l'equatore. Lo spostamento dell'equatore causa a sua volta un cambiamento di posizione del punto vernale che, essendo il punto di riferimento dell'ascensione retta, rende variabile quest'ultima coordinata. In conclusione, la mappa del cielo muta continuamente con un lentissimo moto.

I PRIMI METODI PER IL CALCOLO DELLA LONGITUDINE

Metodo dell'eclissi di Luna

Le eclissi lunari sono un evento astronomico simultaneamente visibile da tutti gli osservatori disposti sulla Terra. Avvengono quando, nelle fasi di plenilunio,¹⁰ l'ombra della Terra ricade sopra il disco lunare colorandolo di rosso.¹¹ Le eclissi lunari sono di tre tipi: totali, parziali e penombrali. Il primo caso avviene quando la Luna penetra interamente nel cono d'ombra terrestre, si parlerebbe invece di eclisse parziale qualora la Luna vi entrasse solo parzialmente. L'eclisse penombrale è un evento astronomico di gran lunga meno interessante rispetto ai precedenti in quanto la Luna non entra neppure in parte nel cono d'ombra rimando nel cosiddetto cono di penombra.

Delle eclissi di Luna si potevano misurare i simultanei t e T dell'istante iniziale, intermedio e finale. Il metodo però presentava numerose difficoltà tra cui quella di determinare esattamente l'istante iniziale dei contatti. Gli errori che si commettevano con questo metodo superavano, anche sulla terraferma, i 20° .¹²

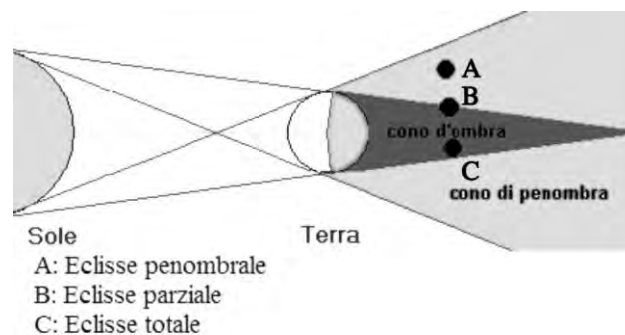


Fig. 2. Le eclissi di Luna (adattato da www.astrogeo.va.it, 20 settembre 2011)

¹⁰ Affinché il fenomeno si verifichi Sole, Terra e Luna devono essere disposti in questo ordine, e ciò avviene solo nelle fasi di Luna piena.

¹¹ Il vero cono d'ombra ha il vertice a 42 raggi terrestri di distanza, la Luna trovandosi a 60 raggi terrestri riceve i raggi solari meno rifratti, cioè quelli rossi (*Astronomia Nautica*, Aldo Nicoli, Del Bianco Editore, p. LII).

¹² Cristoforo Colombo nel 1494 vicino ad Haiti e nel 1504 nei pressi della Giamaica tentò due misurazioni di longitudine commettendo errori di oltre 25° all'ovest (*Storia della Nautica*, Ideale Capasso, p. XCVII).

Metodo delle distanze lunari

Il primo tentativo di applicazione del metodo delle distanze lunari venne da Amerigo Vespucci,¹³ egli cercò di determinare la sua longitudine, quando si trovava lungo le coste del Venezuela, utilizzando la congiunzione della Luna con Marte il 23 Agosto del 1499.

« In quanto alla longitudine dico che per conoscerla incontrai tanta difficoltà che ebbi grandissimo studio in incontrare con sicurezza il cammino che intraprenderemmo. Tanto vi studiai che alla fine non incontrai miglior cosa che vedere e osservare di notte la opposizione di un pianeta con un altro, e il movimento della Luna con gli altri pianeti, perché la Luna è il più rapido tra i pianeti¹⁴ (...) e dopo molte notti passate ad osservare, una notte tra le altre, quella del 23 agosto 1499, nella quale vi fu una congiunzione tra la Luna e Marte, la quale congiunzione secondo l'almanacco doveva prodursi a mezzanotte o mezz'ora prima, trovai che all'uscire la Luna dal nostro orizzonte, che fu un'ora e mezza dopo il tramonto del Sole, il pianeta era passato per la parte di oriente, dico, ovvero che la Luna si trovava più a oriente di Marte, circa un grado e qualche minuto, e alla mezzanotte si trovava più all'oriente quindici gradi e mezzo.»

Il metodo infatti si basa sul misurare la distanza angolare tra la Luna e una stella zodiacale, o un altro corpo celeste ben noto, e di dividere l'arco misurato per il moto orario lunare vero, onde ottenere l'intervallo di tempo fra l'istante della misura e la congiunzione. Essendo noto l'istante della congiunzione, dato dalle effemeridi per un altro luogo, si

¹³ Navigatore (Firenze, 1454 - Siviglia, 1512), fu il primo a navigare lungo le coste del Brasile, verso sud fino alla Patagonia, sua la teoria che le coste appena scoperte non fossero dell'Asia ma di un "nuovo mondo" battezzato, in onore allo scopritore, con il nome di America (*Enciclopedia UTET* vol. XIX, p. XDVII).

¹⁴ La Luna percorre sulla volta celeste ogni ora una distanza pari circa al suo raggio. Tra tutti i corpi celesti ben visibili è quello con velocità apparente maggiore (*Longitudine*, Dava Sobel, BUR, p. XXIV).

poteva ottenere la differenza di longitudine fra i due luoghi dalla differenza di tempo tra le due congiunzioni.¹⁵

Il metodo venne poi teorizzato più dettagliatamente nel 1514 dall'astronomo tedesco Johannes Werner.¹⁶ Egli suggerì di disegnare la mappa della posizione delle stelle lungo la traiettoria lunare e confrontare, quando la Luna si sarebbe avvicinata ad alcune di tali stelle ben note e visibili, l'ora in cui si avvistava l'eclisse al meridiano dell'osservatore con l'ora prevista per il meridiano di Greenwich. Con questo metodo si poteva ricavare la differenza di longitudine. Il problema era che le posizioni delle stelle non erano ancora dettagliatamente note ed inoltre non si era ancora a conoscenza delle leggi del moto della Luna e sarebbe stato quindi impossibile prevederne la traiettoria. Il metodo venne così abbandonato.

In Inghilterra dopo 160 anni, nel 1674, Carlo II fu avvisato dalla sua amante, Louise de Kerouaille,¹⁷ che un francese era giunto dal suo paese fino all'Inghilterra per rendere nota la sua proposta per risolvere il problema della longitudine. Il francese si chiamava Saint Pierre e propose al re nient'altro che il metodo ideato da Werner. Il re formò una commissione, per valutarne l'attendibilità, costituita da Robert Hooke¹⁸ e Christopher Wren.¹⁹ La commissione si avvale del parere di John Flamsteed (1641-1719), noto astronomo, il quale disse che la teoria era buona, ma come un secolo e mezzo prima, il metodo era inattuabile per i soliti motivi. Il re però decise di fondare un osservatorio a Greenwich e di incaricare Flamsteed di disegnare una mappa del cielo stellato. Flamsteed

¹⁵ L'errore nel calcolo effettuato da Vespucci superò i 30° (*Storia della Nautica*, Ideale Capasso, IIM, p. XCIII).

¹⁶ (Norimberga, 14 febbraio 1468 – Norimberga, maggio 1522) è stato un cartografo, matematico e religioso tedesco. In cartografia, raffinò e divulgò la *proiezione di Werner*, una proiezione conica dalla caratteristica forma a cuore.

¹⁷ Nome completo Louise Renée de Penancoët de Kérouaille (settembre 1649 – 14 novembre 1734).

¹⁸ Fisico, matematico e naturalista inglese (Freshwater, 1635- Londra, 1703). Usò per la prima volta il termine cellula, socio della Royal Society di Londra, contribuì ad allestire l'osservatorio di Greenwich, inoltre fu il primo a proporre l'utilizzo di strumenti a riflessione per l'osservazione astronomica (*Enciclopedia UTET*, vol. IX, p. DCCCLXXIV; *Storia della Nautica*, Ideale Capasso, p. CXXXIII).

¹⁹ (East Knoyle, 20 ottobre 1632 – Londra, 25 febbraio 1723) è stato un architetto e scienziato inglese. Celebre soprattutto per la costruzione della cattedrale di St. Paul a Londra (*Longitudine*, Dava Sobel, BUR, p. XX).

divenne astronomo reale e direttore dell'osservatorio di Greenwich. Nel documento che istituiva l'osservatorio il re chiedeva all'astronomo di:

“applicarsi con tutta la cura e diligenza possibili a rettificare le tavole dei moti dei cieli, e la posizione delle stelle fisse, sì da trovare la tanto agognata longitudine in mare al fine di perfezionare l'arte della navigazione”.

Il primo catalogo dettagliato delle stelle fu pubblicato nel 1725. Anche se nel 1712 Sir Isaac Newton²⁰ riuscì a mettere le mani su i dati che Flamsteed custodiva gelosamente e pubblicò un'edizione pirata del catalogo delle stelle. L'astronomo ne ordinò 300 delle 400 copie stampate e dette loro fuoco.

Il metodo delle distanze lunari divenne praticamente utilizzabile solo nel 1767 quando l'astronomo Reale Nevil Maskelyne (1732-1811), dopo aver sperimentato il metodo in un viaggio verso S. Elena dette inizio alla pubblicazione annuale del *Nautical Almanac*, in cui erano riportate le posizioni della Luna in funzione del tempo, e nel 1774 il capitano James Cook,²¹ doppiando capo Horn, determinò le coordinate utilizzando la distanza angolare Luna-Sole utilizzando l'ottante.²² Fu questo il primo tentativo ben riuscito della determinazione della longitudine con questo metodo.

²⁰ Fisico e matematico inglese (Woolsthorpe, 1642- Kensington, 1727), autore della legge di gravitazione universale.

²¹ Navigatore ed esploratore inglese (Marton, 1728- Hawaii,1779), grazie a lui si ebbe il primo contatto europeo con le coste dell'Australia e delle Hawaii e la prima circumnavigazione della Nuova Zelanda. Riuscì anche, nel 1766, a ricavare la longitudine con una eclisse di Sole (*Enciclopedia UTET*, vol. V, p CDX).

²² Da poco introdotto nella Marina britannica, l'ottante fu inventato nel 1730 da John Hadley (1682-1744) (*Storia della Nautica*, Ideale Capasso, IIM, p. CXXXIV).

Metodo Whiston - Ditton

William Whiston e Humphrey Ditton erano due matematici che vissero a cavallo tra il 1600 e il 1700. Essi proposero un metodo che si discostava dai canoni dell'epoca.²³ La loro originale soluzione consisteva nel disporre, lungo le rotte più trafficate, dei vascelli, i quali, posizionati a longitudini note, ad ore internazionalmente prestabilite sparassero delle cannonate in aria. La palla di cannone sarebbe esplosa in aria ad una quota di circa 2000m emettendo una luce simile ai fuochi d'artificio.²⁴ I naviganti, udendo i suoni e vedendo la luce, potevano calcolare la differenza di tempo, quindi la distanza, che separava loro dal vascello, calcolando in questo modo la differenza di longitudine.

Chiaramente il metodo venne scartato per un'infinità di motivi: innanzi tutto era difficile ancorare delle navi in mezzo all'oceano (all'epoca si credeva che la profondità massima dell'oceano Atlantico fosse 550m invece dei 9219m),²⁵ in secondo luogo era costoso mantenere numerosi equipaggi in mezzo al mare e le relazioni internazionali ancora non erano abbastanza stabili da garantire il funzionamento di un simile sistema, ma soprattutto la differenza di tempo che trascorre tra il suono e la luce poteva essere misurata solo approssimativamente quindi il metodo risultava non molto preciso.

²³ All'epoca si riteneva che la soluzione del problema della longitudine arrivasse dagli astronomi, per questo anche l'invenzione del cronometro marino fece fatica ad affermarsi.

²⁴ La quota di 2000m era il limite tecnologico dell'epoca, ma è sufficiente se si considera che il suono di una cannonata si può udire fino a 150 km. Considerando la portata geografica; con una elevazione (e) di 2000m e un'altezza media dell'imbarcazione (h) di 6m risulta: $P_g = 2.04 \cdot (\sqrt{e} + \sqrt{h}) = 96Nm$ ovvero circa 177 km.

²⁵ Profondità della fossa di Porto Rico, la profondità media dell'Atlantico è intorno ai 3500m.

IL METODO DI GALILEO

Storia

Galileo Galilei nacque il 15 febbraio 1564 a Pisa, figlio di Vincenzo Galilei²⁶ e di Giulia Ammannati.²⁷ Nel 1589 ottenne dal granduca Ferdinando I²⁸ la cattedra di matematica nello Studio di Pisa. Nell'estate del 1591 il padre Vincenzo morì, lasciando a Galileo il dovere di provvedere al mantenimento della propria famiglia (Galileo era il primo di sette figli). Non bastando il modesto stipendio egli si rivolse all'influente amico Guidobaldo Del Monte²⁹ che lo raccomandò al prestigioso Studio di Padova, dove era vacante la cattedra di matematica. Durante la permanenza a Padova Galileo scoprì quattro satelliti di Giove. Le nuove scoperte furono pubblicate il 12 marzo del 1610 nel *Sidereus Nuncius*, una copia del quale Galileo inviò al granduca fiorentino Cosimo II³⁰ insieme con un esemplare del suo cannocchiale e la dedica dei quattro satelliti; lo stesso Galileo metteva in evidenza, nel suo libro, la necessità di avere un telescopio particolarmente potente per poter effettuare l'osservazione.³¹ Con questa mossa si mise in evidenza l'intenzione di Galileo di accattivarsi il favore della Casa medicea, molto probabilmente non soltanto per fini economici, ma anche per ottenere un'influente protezione in vista delle polemiche che il suo libro avrebbe certamente suscitato. Il 5 giugno 1610 il governo fiorentino comunicava allo scienziato l'avvenuta assunzione come «Matematico primario dello Studio di Pisa» e

²⁶ Vincenzo Galilei (S. Maria a Monte, ca. 1520,1591) musicista e teorico musicale (*Enciclopedia UTET*, vol. VIII p. DXLI).

²⁷ Giulia Ammannati (Villa Basilica 1538, Firenze 1620).

²⁸ Ferdinando granduca di Toscana (Firenze,1549-ivi, 1609) figlio di Cosimo I, successe al fratello Francesco I rinunciando alla dignità cardinalizia di cui, a 14 anni, era stato insignito da Pio V. Gli successe Cosimo II (*Enciclopedia UTET*, vol. VII p. DCC).

²⁹ Guido Baldo Del Monte (Pesaro, 11 gennaio 1545, Monte Barroccio, 6 gennaio 1607) è stato matematico, filosofo, astronomo e marchese italiano, amico di Galileo. Il professore venuto a mancare all'università di Padova nel 1588 era Giuseppe Moletti.

³⁰ Cosimo II (Firenze 1590-ivi,1621) successe al padre nel 1609 è stato anche allievo di Galileo e lo protesse nel 1615, quando fu citato per la prima volta a Roma innanzi al Sant'Uffizio (*Enciclopedia UTET*, vol. V p. DXXXVI).

³¹ «Su questo è bene che siano avvertiti tutti coloro che vogliono darsi a simili osservazioni. In primo luogo è necessario infatti che si preparino un cannocchiale esattissimo, il quale rappresenti gli oggetti chiari, distinti e non protetti da alcuna caligine, e li ingrandisca almeno quattrocento volte, poiché allora li mostrerà venti volte più vicini.» (*Sidereus Nuncius* G. Galilei).

in settembre Galileo raggiunse Firenze. Nel 1610 Galileo elaborò il Giovilabio³² uno strumento in grado di prevedere le eclissi dei satelliti di Giove. Egli, anche senza essere uomo di mare, come tutti i filosofi e naturalisti dell'epoca, conosceva il problema della longitudine ed ideò, grazie proprio alla recente scoperta, un metodo per risolverlo. Un'occasione per proporre il nuovo metodo si presentò nel 1612 quando il governo spagnolo chiese al granduca di toscana di armare, per combattere i corsari, alcuni galeoni ormeggiati nel porto di Livorno. Il granduca accolse la richiesta, ma domandava in cambio alcuni privilegi riguardanti il commercio con le indie; ed aggiungeva uno scritto noto con il nome di proposta della longitudine. Questa lettera metteva in rilievo l'importanza del nuovo metodo ideato da Galileo sostenendone la superiorità rispetto alle eclissi lunari.³³ Ma la proposta di Galileo giunse alla corte circa quindici anni dopo la firma del decreto per lo "scopritore della longitudine"³⁴ ed il sovrano si era stancato ormai di ascoltare metodi inconcludenti. Il progetto venne respinto perché giudicato troppo complicato ed inoltre la difficoltà di osservare i satelliti da bordo, ove, a causa dei movimenti della nave, non era possibile l'installazione di cannocchiali fissi, non era trascurabile. Lo stesso Galileo ammise che anche sulla terraferma bastava il battito del cuore perché Giove uscisse dal campo visivo del telescopio. Galileo insisté, anche grazie all'aiuto dell'ambasciatore toscano a Madrid conte Orso D'Elci, e s'ingegnò per il progetto del celatone.³⁵ Questo strumento venne utilizzato per la prima volta a Livorno: Galileo imbarcò un proprio allievo per eseguire una serie di prove sperimentali poco lontano dalla costa, ma il metodo non

³² Giovilabio: strumento ideato da Galileo Galilei, numerose copie e progetti del medesimo si trovano al museo della scienza di Firenze. Sullo strumento sono segnate le tavole dei moti medi di ciascuno dei satelliti. Il disco girevole più grande rappresenta il piano orbitale di Giove e dei rispettivi satelliti, le linee verticali distano tra loro un raggio di Giove (in scala), il disco più piccolo invece rappresenta il moto della Terra, l'asta che unisce loro serve per ricondurre al Sole il moto degli astri annullando in tal modo la parallasse Terra Sole Giove.

³³ In maniera semplicistica il metodo delle eclissi lunari si articolava in questo modo: se per esempio era prevista un'eclissi totale di Luna per mezzanotte sopra Madrid e da un navigante veniva osservata alle undici significava che quest'ultimo si trovava a 15° a ovest rispetto alla suddetta località, però all'epoca non esistevano effemeridi lunari molto precise (comportavano errori fino a otto gradi), inoltre non era difficile commettere errori fino a quattro gradi dovuti alla difficoltà dell'osservazione, ma soprattutto le eclissi erano troppo rare (*Longitudine*, D. Sobel, p. XXIV; *Storia della Nautica*, I. Capasso, IIM, p. CXIII).

³⁴ Il re Filippo III di Spagna aveva stanziato nel 1598 un lauto vitalizio in ducati per chi avesse scoperto un metodo per calcolare la longitudine (*Longitudine*, D. Sobel, BUR, p. XXVI).

³⁵ Questo strumento era costituito da un elmetto metallico dotato di una visiera sulla quale era installato un piccolo cannocchiale, era possibile regolare la visiera, incernierata ai lati dell'elmetto, in modo che l'occhio e l'asse del cannocchiale restassero allineati.

convinse mai. Egli immaginò in alternativa un recipiente di forma emisferica, dentro al quale si disponeva il marinaio addetto all'osservazione. Questo contenitore galleggiava sull'olio contenuto in una vasca, anch'essa di forma emisferica e di diametro di poco più grande. Il bagno d'olio, come una sospensione cardanica, avrebbe neutralizzato le oscillazioni della nave mantenendo stabile la posizione dell'osservatore. A padre Benedetto Castelli³⁶ fu affidato il compito di insegnare il metodo agli ufficiali della Marina toscana. Nel 1633 Galileo finì confinato ad Arcetri,³⁷ nel 1636 si rivolse agli Stati Generali, scrivendo loro una lettera nella quale cercò di vendere il suo metodo. Nell'aprile 1637 gli Stati Generali espressero a Galileo tutta la loro gratitudine per la preziosa offerta e gli inviarono una collana d'oro accompagnata dalla promessa di future più larghe ricompense. Galileo ringraziò della lettera, ma dovette rifiutare la collana per evitare reazioni ecclesiastiche inoltre nel 1638 gli stati generali inviarono in Italia Martino Ortensio, ma una severa proibizione della chiesa impedì a Galileo di ricevere l'olandese.

Negli ultimi anni di vita Galileo si dedicò alla compilazioni delle effemeridi insieme a padre Vincenzo Renieri. Ormai cieco, si spense la notte dell'8 gennaio 1642 ad Arcetri. Gli studi vennero portati avanti dal suo discepolo, ma anche questi dopo non molti anni morì. Infine tutte le osservazioni e gli scritti lasciati da Galileo e dal Renieri, furono derubati dallo studio di Arcetri.³⁸

La storia del metodo però non si interruppe con la morte di Galileo, ma venne portata avanti da un altro scienziato, allora noto più come astrologo che come astronomo, che rispondeva al nome di Gian Domenico Cassini.

Cassini nacque l'8 giugno 1625 a Perinaldo, in provincia d'Imperia. Nel 1650 grazie alle osservazioni molto precise, ma soprattutto alla fama di astrologo,³⁹ che Cassini si era

³⁶ Scienziato benedettino (Brescia o dintorni, ca. 1577 - Roma, 1643). Fu scolaro di Galileo a Padova e lo raggiunse a Firenze nel 1611; tra i primi confermò le scoperte astronomiche divulgate da Galileo (*Enciclopedia UTET*, vol. IV p. CCXXX).

³⁷ Il 12-IV-1633 Galileo subì il primo interrogatorio da parte del Sant'Uffizio. A seguito dell'abiura la condanna al carcere fu trasformata in confino (si intimava a Galileo di «stare da solo, di non chiamare né di ricevere alcuno, per il tempo ad arbitrio di Sua Santità») presso la sua villa ad Arcetri dove Galileo si trasferì in data 1-XII-1633 (*Enciclopedia UTET*, vol. VIII p. DXXXVII).

³⁸ Informazione tratta dal *Racconto storico della vita del sig. Galileo Galilei*, Vincenzo Viviani, 1654.

³⁹ Acquisì notorietà come astrologo nel 1649, per aver previsto la vittoria delle truppe di Innocenzo X, adunate a Bologna per una spedizione militare contro il duca di Parma.

involontariamente creato, ottenne la cattedra all'università di Bologna. Nel 1665 studia le eclissi di Sole e pubblica *Le Tavole dei pianeti*. Le elaborate effemeridi gli procurarono un invito alla corte di Re Sole da parte di Colbert, ministro di Luigi XIV, e direttore dell'Académie des Sciences.⁴⁰ A Parigi Cassini venne nominato direttore dell'osservatorio astronomico⁴¹ potendo così lavorare sul metodo ideato da Galileo sotto la protezione stessa del re. Da direttore Cassini si rivolse agli astronomi della Polonia e della Germania perché cooperassero in uno sforzo internazionale a misurare la longitudine e disegnare così, nel proprio osservatorio, il primo planisfero con coordinate geografiche estremamente precise.⁴² Il trionfo del metodo di Galileo indusse i cartografi a chiedere previsioni più precise circa le eclissi dei satelliti di Giove⁴³ e di particolare interesse fu appunto la realizzazione, ad opera di Cassini, delle effemeridi di quegli eventi nel 1668, ovvero il libro noto come *Ephemerides Bononienses Mediceorum syderum ex hypothesibus et tabulis*. La determinazione delle posizioni delle lune del grande pianeta gli consentì di costruire delle tabelle con gli istanti di occultazione dei satelliti dietro Giove. L'osservazione della scomparsa di un satellite permetteva di leggere sulle tabelle l'ora precisa in cui questa avveniva, il che dava una misura estremamente accurata del tempo. Fu in questo fermento di iniziative che l'astronomo danese Ole Roemer,⁴⁴ in visita nella capitale francese, fece una sorprendente scoperta. Le eclissi avvenivano in anticipo sul previsto quando la Terra raggiungeva il punto di massima vicinanza a Giove e viceversa quando si era nel punto di massima distanza. La spiegazione stava nella velocità della luce. Le eclissi avvenivano con regolarità, ma il momento in cui venivano avvistate dalla Terra dipendeva dalla distanza che la luce doveva percorrere attraverso lo spazio. Fu proprio

⁴⁰ Luigi XIV aveva un debole per la scienza. Nel 1666 aveva dato la sua benedizione alla fondazione dell'Académie Royale des Sciences, propugnata da Jean Colbert (*Longitudine*, D. Sobel, BUR, p. XXVIII).

⁴¹ Sempre su sollecitazione di Colbert e sotto l'esigenza sempre più acuta di risolvere il problema della longitudine, il sovrano approvò la costruzione di un osservatorio astronomico a Parigi (*Longitudine*, D. Sobel, BUR, p. XXVIII).

⁴² Re Luigi XIV, vedendo la nuova mappa dei suoi domini disegnata sulla base di un preciso calcolo della longitudine, si lamentò di avere ceduto più territori ai suoi astronomi che ai suoi nemici (*Longitudine*, D. Sobel, BUR, p. XXVII).

⁴³ Nella prefazione alla prima edizione italiana del compendio di astronomia di G. Lalande, del 1776 si legge: «La scoperta dei satelliti di Giove perfezionò tanto le nostre carte marine quanto non si sarebbe fatto dopo dieci mille anni di navigazione e di viaggi; e quanto più si farà nota la loro teoria tanto più esatto e facile sarà il metodo delle longitudini». (*Storia della Nautica*, I. Capasso, IIM, p. CXV).

⁴⁴ Ole Rømer (Aarhus, 25 settembre 1644 – Copenaghen, 19 settembre 1710) è stato un astronomo danese.

grazie a questo effetto scoperto da Cassini che Ole Rømer nel 1675 riuscì a misurare la velocità della luce che fino a quel momento si pensava fosse infinita.

Il metodo successivamente venne portato avanti da astronomi come James Bradley⁴⁵ o P. Wargentin,⁴⁶ ma perse totalmente importanza per la navigazione dopo l'invenzione del cronometro marino da parte di un falegname.⁴⁷

I satelliti medicei

Io, Europa, Ganimede e Callisto sono i satelliti maggiori di Giove, conosciuti anche con il nome di satelliti galileiani, dal suo scopritore, o satelliti medicei.⁴⁸ Questi satelliti



Fig.3. I satelliti medicei (adattato da www.cortinastelle.it, 20settembre 2011)

sarebbero visibili anche ad occhio nudo se non fossero oscurati dalla più intensa luce riflessa da Giove.⁴⁹ Per osservarli è comunque sufficiente un comune cannocchiale.⁵⁰ Nella figura, da sinistra verso destra, i quattro satelliti: Io, Europa, Ganimede e Callisto.

⁴⁵ 1692- 1762 scopritore dell'aberrazione della luce.

⁴⁶ Svedese, pubblicò, nel 1746, altre tavole nel *British Nautical Almanac*.

⁴⁷ John Harrison.

⁴⁸ Ecco dunque quattro Stelle riservate al vostro inclito nome e non del numero gregario e meno insigne delle fisse, ma dell'ordine illustre dei Pianeti che con moto diverso, attorno a Giove nobilissima Stella, come progenie sua schietta, compiono l'orbita loro con celerità mirabile [...] E lo stesso Artefice delle Stelle parve con segni manifesti invitarmi a dedicare al nome eccelso della vostra Altezza piuttosto che ad altri questi nuovi Pianeti [...] Che se io per primo le studiai, chi ragionevolmente mi riprenderà se imporrò loro anche un nome e le chiamerò ASTRI MEDICEI? Nella speranza che da questo nome verrà a questi Astri tanto onore quanto gli altri ne recarono agli altri Eroi. (*Sidereus Nuncius*, Galileo Galilei).

⁴⁹ La magnitudine dei satelliti medicei è +6 che corrisponde a quella delle stelle più deboli visibili ad occhio nudo.

⁵⁰ Le informazioni che abbiamo riguardo i satelliti galileiani provengono dalle esplorazioni delle sonde statunitensi Pioneer 10 e 11, Voyager 1 e 2 e Galileo (*Atlante del Cielo*, Giunti, p. CLXXIII).

Il satellite Io è caratterizzato da una natura vulcanica: le attrazioni tra satellite e pianeta e tra satellite e satellite generano intense forze di marea, le quali causano allungamenti e contrazioni del diametro del satellite di più di 100m, questo stress meccanico a cui il satellite è sottoposto genera, a causa degli attriti interni, calore, che è probabilmente la causa del carattere vulcanico del satellite. Le temperature sono mediamente intorno ai 130 K (-143.15°C), ma nei punti eruttivi si raggiungono i 2000 K (1762.85°C). La superficie è priva di crateri da impatto e questo suggerisce che la formazione del pianeta sia relativamente recente.

Europa, al contrario, è ricoperto da una superficie ghiacciata,⁵¹ la cui temperatura si aggira intorno ai 120 K. È di poco più piccolo della Luna.⁵² Europa è il corpo più liscio del sistema solare: le formazioni superficiali più elevate non superano qualche centinaia di metri.

Ganimede è il satellite più grande del sistema solare,⁵³ possiede una tenue atmosfera di ossigeno, anche su Ganimede si ipotizza la presenza di acqua liquida al di sotto della superficie ghiacciata spessa da 100 a 200 km.

Callisto, secondo per dimensioni tra i satelliti di Giove, presenta una superficie particolarmente craterizzata, dovuta agli impatti con i meteoriti catturati dal campo gravitazionale di Giove.

⁵¹ Con molta probabilità ospita acqua liquida. I numerosi sorvoli effettuati dalla sonda spaziale Galileo hanno permesso di ipotizzare la presenza di acqua salata sotto l'immensa crosta ghiacciata simile al pack dei mari polari della Terra.

⁵² Il diametro equatoriale della Luna corrisponde a 1738 km, quindi solo 169 km più grande di Europa.

⁵³ Supera Mercurio per dimensioni (raggio 2439 km) e Plutone per dimensioni e massa (raggio 1137 km, massa 1.27×10^{22} kg).

| Nome | Raggio (km) | Massa (kg) | Distanza dal centro di Giove (10³km) | Periodo orbitale |
|-----------------|------------------------|-----------------------|--|-----------------------------|
| Io | 1815 | 8,94 10 ²² | 421.6 | 1,77 giorni |
| Europa | 1569 | 4,8 10 ²² | 670.9 | 3,55 giorni |
| Ganimede | 2631 | 1,48 10 ²³ | 1070 | 7,16 giorni |
| Callisto | 2400 | 1,08 10 ²³ | 1 883 | 16,69 giorni |

Risonanza orbitale

Un altro fenomeno che ha facilitato l'utilizzo dei satelliti medicei come orologio naturale è quello che in meccanica celeste viene definito come risonanza orbitale; questo effetto avviene quando due corpi orbitanti hanno periodi di rivoluzione tali che il loro rapporto è esprimibile in frazioni di numeri interi. Quando i corpi interessati sono tre o più, come nel caso dei satelliti di Giove, si parla di risonanza di Laplace.

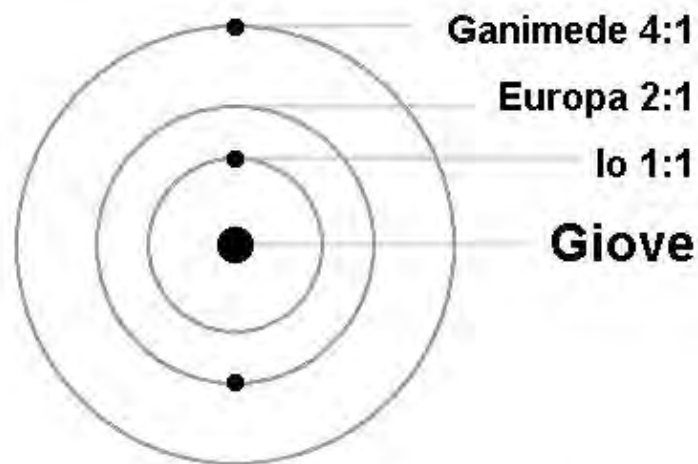


Fig. 4. Risonanza orbitale (adattato da www.wikipedia.org, 20 settembre 2011).

Nel caso dei satelliti medicei la risonanza è: Io 1:1, Europa 2:1, Ganimede 4:1. Ciò significa che nel periodo in cui Ganimede effettua una rivoluzione Europa ne ha effettuate due ed Io quattro.

Fenomeni medicei



Fig. 5 Fenomeni medicei
(adattato da www.vialattea.net, 20 settembre 2011).

Il moto di rivoluzione dei quattro satelliti medicei di Giove: Io, Europa, Ganimede e Callisto, permette di osservare dalla Terra fenomeni di notevole interesse astronomico, ma non solo. Grazie a Galileo e a Cassini questi eventi, che si succedono ogni notte con una frequenza di 1000 volte l'anno, sono stati sfruttati come orologi naturali: un singolo fenomeno infatti, data la notevole distanza, può essere osservato simultaneamente da tutti gli osservatori che riescono a vedere Giove dalla Terra.

I singoli fenomeni sono:

- **transito del satellite**: il disco di uno dei quattro satelliti transita davanti al disco di Giove;
- **transito dell'ombra**: l'ombra di uno dei quattro satelliti transita **sul disco di Giove**;
- **eclisse**: il disco di un satellite scompare dentro l'ombra di Giove;
- **occultazione**: il disco di un satellite scompare dietro il disco di Giove.⁵⁴

⁵⁴ La differenza sostanziale tra eclisse e occultazione è che nella prima si osserva il satellite sparire nell'ombra e non dietro il disco del pianeta, ciò significa che questo fenomeno può avvenire anche quando, osservando al telescopio, il satellite si trova a una certa distanza dal pianeta. Nella seconda invece si vede il satellite, ancora illuminato dalla luce riflessa del Sole, tramontare dietro il disco del pianeta.

Ogni fenomeno ha un inizio e una fine. Questi singoli fenomeni sono stati osservati per molti anni, da Galileo prima e da Cassini poi, con il fine di crearne delle effemeridi. Nelle effemeridi gli orari sono generalmente riferiti a Greenwich⁵⁵ e al transito del centro del disco o del centro dell'ombra del satellite.

I singoli fenomeni sono così indicati

- **Tr.** = transito del disco del satellite;
- **Occ.** = occultazione;
- **Ecl.** = eclisse;
- **Omb.** = transito dell'ombra del satellite.

Al seguito viene indicato se il fenomeno inizia (I) o finisce (F). Esempio: **Ecl.F.**= fine dell'eclisse.

Il satellite interessato al fenomeno viene indicato con un numero romano:

- **I:** Io
- **II:** Europa
- **III:** Ganimede
- **IV:** Callisto

Per cui: - **IV. Occ.I.** – significa che inizia l'occultazione del satellite Callisto.

Infine, considerando che i fenomeni si verificano simultaneamente per ogni osservatore che si trova sulla Terra, viene indicato l'orario UT.

Quindi la scrittura completa sarà: - **18 22 II. Omb. F. UT** - ed indica che all'ora di Greenwich 18:22 è finito il transito dell'ombra del satellite Europa sul disco di Giove.

⁵⁵ Per tempo riferito a Greenwich T_m si intende tempo medio universale TU o *universal time UT*.

Calcolo della longitudine

La risoluzione del problema, da un punto di vista strettamente nautico e scientifico, è solo apparentemente complicata. Tuttavia, la relativa stabilità di una piattaforma come quella di una nave complica, e non poco, l'osservazione dei satelliti di Giove. Tenere, infatti, costantemente puntato il cannocchiale verso il pianeta ed i suoi satelliti è la chiave di volta del metodo; avvistare il momento esatto in cui avviene un fenomeno medicale ci permette di ricavare l'UT, esattamente come un orologio che mostra l'ora solo in un determinato istante e per un brevissimo intervallo di tempo. Una volta che la complicata osservazione ha avuto luogo è essenziale misurare repentinamente l'altezza del pianeta⁵⁶ sull'orizzonte dell'osservatore, altro dato di cui il metodo non può fare a meno. Superata la parte pratica, quella teorica presenta meno difficoltà. Il metodo si basa infatti sul determinare l'angolo orario locale⁵⁷ del pianeta Giove nel momento in cui avviene il fenomeno medicale.

⁵⁶ I primi strumenti per misurare le altezze degli astri erano il quadrante e la balestriglia. Il primo venne importato dagli arabi ed era formato da un arco graduato di 90°, un lato del quale portava due traguardi, mentre nel vertice dell'angolo retto un filo a piombo scendeva sull'arco graduato. Il secondo consisteva in un bastone parallelepipedo, lungo circa 75cm, sul quale poteva scorrere un altro asse più corto, detto traversa, perpendicolare al bastone ed infilato a questo nel suo punto centrale (*Storia della Nautica*, Ideale Capasso, IIM, p. LXXXIX).

⁵⁷ Arco di equatore celeste compreso tra il mezzo cielo superiore e il cerchio orario passante per "l'astro", si misura da 0 a 360° o da 0 a 24h.

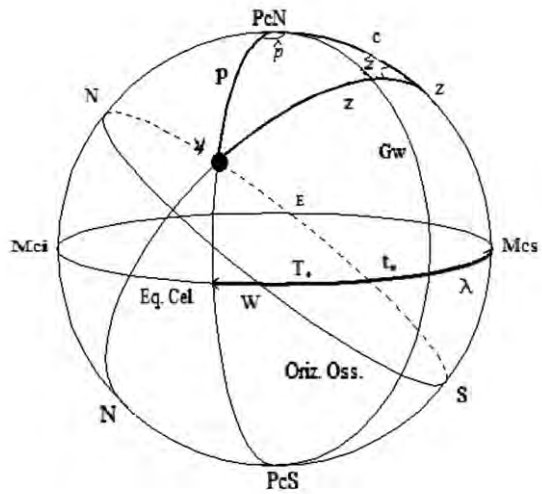


Fig. 6

È questa operazione che ci permetterà di trovare la longitudine sfruttando la relazione:⁵⁸

$$t - T = \lambda$$

Per trovare il tempo locale basta applicare il teorema di Eulero,⁵⁹ per la risoluzione dei triangoli sferici, più precisamente applicato al triangolo di posizione.⁶⁰

⁵⁸ Dalla seguente proiezione ortografica equatoriale della sfera celeste è possibile verificare le seguenti relazioni: $T=t-\lambda$; $t=T+\lambda$; $\lambda=t-T$; $t_A=ts+CO\alpha$. Z e Z_g sono le proiezioni sulla sfera celeste dello zenith dell'osservatore e dell'osservatorio di Greenwich, A rappresenta l'astro, Mcs e Mci sono rispettivamente il mezzo cielo superiore e il mezzo cielo inferiore, $CO\alpha$ la coascensione retta, PcN il polo celeste nord, ts il tempo sidereo e γ il punto d'intersezione tra l'eclittica e l'equatore celeste.

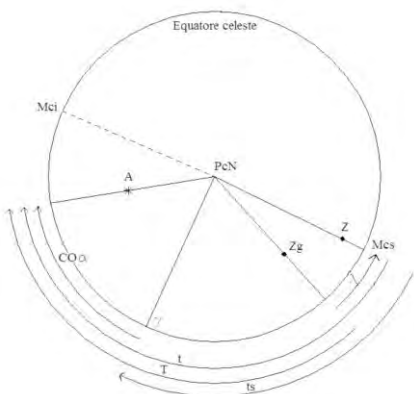


Fig. 7

⁵⁹ Leonardo Eulero, matematico svizzero (Basilea, 1707 - Pietroburgo, 1783). Il teorema che prende il suo nome era però già noto prima in quanto fu enunciato dall'astronomo arabo Albatenio nel IX secolo (*Storia della Nautica*, Ideale Capasso, IIM, p. VC).

⁶⁰ Il triangolo sferico è costituito dall'incontro di tre cerchi massimi. Il triangolo di posizione ha come lati: la distanza polare p che è complementare alla declinazione dell'astro ovvero: $p = (90-\delta)$, la distanza zenitale complementare dell'altezza (h), e la colatitudine, complementare della latitudine(ϕ). Come angoli: l'angolo al polo \hat{p} , l'angolo zenitale \hat{z} e l'angolo parallattico (non indicato in figura).

Nel nostro caso il teorema di Eulero viene applicato nel seguente modo:⁶¹

$$\cos z = \cos p \cdot \cos c + \operatorname{sen} p \cdot \operatorname{senc} \cdot \cos \hat{p}$$

Partendo da questo teorema e considerando le seguenti relazioni:⁶²

⁶¹ Il teorema di Eulero è utile per trovare un elemento mancante, ad esempio A, in un triangolo sferico noti gli altri due lati: B,C e l'angolo opposto α .

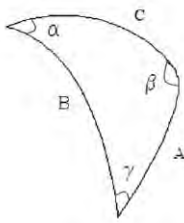


Fig. 8

$$\cos A = \cos B \cdot \cos C + \operatorname{sen} B \cdot \operatorname{sen} C \cdot \cos \alpha$$

$$\begin{aligned} \overline{HB} = \overline{OH'} &\rightarrow y_B = x_{B'} \rightarrow \operatorname{sen} \alpha = \cos(90^\circ - \alpha) \\ \overline{OH} = \overline{H'B'} &\rightarrow x_B = y_{B'} \rightarrow \cos \alpha = \operatorname{sen}(90^\circ - \alpha) \end{aligned}$$

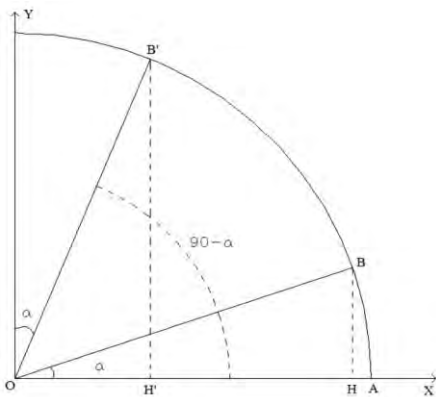


Fig. 9

Per quanto riguarda il nostro caso valgono le seguenti:

$$\begin{aligned} \cos c &= \cos(90 - \varphi) = \operatorname{sen} \varphi & \cos p &= \cos(90 - \delta) = \operatorname{sen} \delta \\ \operatorname{senc} &= \operatorname{sen}(90 - \varphi) = \cos \varphi & \operatorname{sen} p &= \operatorname{sen}(90 - \delta) = \cos \delta \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 p &= 90^\circ - \delta \\
 c &= 90^\circ - \varphi \\
 z &= 90^\circ - h
 \end{aligned}$$

È possibile, tramite la formula inversa del teorema di Eulero, ricavarsi l'angolo al polo:

$$\cos \hat{p} = \frac{\text{sen} h - \text{sen} \delta \cdot \text{sen} \varphi}{\text{cos} \delta \cdot \text{cos} \varphi}$$

Per quanto riguarda la declinazione⁶³ (δ) del pianeta e la latitudine (φ) della nostra nave, le ricaviamo nel seguente modo: la prima ci viene fornita dalle effemeridi per ogni UT, la seconda è ricavabile osservando la stella polare.⁶⁴

Adesso per ricavare l'angolo orario locale è sufficiente considerare la seguente relazione.⁶⁵

⁶³ La declinazione è l'arco di meridiano celeste compreso tra l'equatore celeste e l'astro, può essere positiva o negativa a seconda dell'emisfero in cui si trova l'astro. In generale la declinazione di un astro rimane pressoché costante per tutto il corso dell'anno, cosa che non avviene per i pianeti.

⁶⁴ Nella figura si nota come l'altezza della polare coincida con la latitudine. In realtà all'altezza vera misurata bisogna aggiungere delle correzioni (in quanto il prolungamento dell'asse terrestre non è perfettamente coincidente con la stella polare) in funzione del tempo sidero, dell'altezza e del mese in cui si effettua l'osservazione.

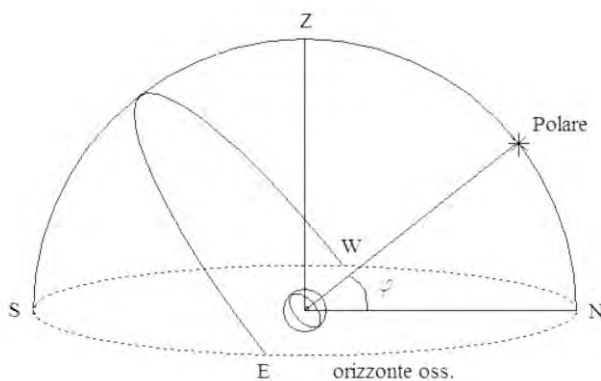


Fig. 10

⁶⁵ Dalla figura si nota, considerando che l'angolo al polo si misura da 0 a 180°, che per gli astri a ovest l'angolo al polo non coincide con l'angolo orario, ma è legato dalla relazione espressa nel paragrafo.

$$\hat{p}_w = t \rightarrow t < 180^\circ$$

$$\hat{p}_e = 360 - t \rightarrow t > 180^\circ$$

L'ultima operazione consiste in una semplice differenza:

$$t - T = \lambda$$

Il metodo, a livello teorico, come detto precedentemente, non mostra particolari difficoltà tecniche; sarebbe stato quindi perfetto per i marinai⁶⁶ dell'epoca, ma a livello pratico le problematiche di stabilità già riportate rendono l'osservazione poco praticabile. Vane furono le idee di Galileo inerenti il celatone e la sfera in bagno d'olio, e il metodo venne abbandonato dalle varie marine europee, ma ebbe un ottimo successo tra i cartografi.

ESEMPIO PRATICO

Il giorno 16 settembre 2011 vogliamo provare a calcolare un punto nave con il metodo di Galileo. Chiaramente, per verificare l'esattezza del metodo, proveremo a risolvere il problema in un luogo di coordinate note:

$$\varphi: 43^\circ 31' 42'' \text{N}$$

$$\lambda: 10^\circ 18' 30'' \text{E}$$

supponiamo di ricavare da un almanacco astronomico il seguente dato:

041321UT II Tr.I.

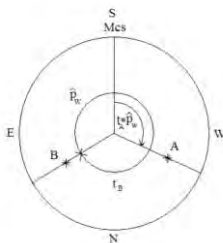


Fig. 11

⁶⁶ Generalmente si cerca di non complicare troppo i calcoli nautici, a bordo ci si serve di tavole che permettono di risolvere i problemi di trigonometria. Bisogna considerare inoltre che, per avere una bontà adeguata del punto nave, i naviganti hanno a disposizione poco tempo per risolvere i suddetti calcoli.

che significa che all'ora di Greenwich 04h13m21s inizierà il transito del satellite Europa sul disco di Giove. Durante l'attesa del fenomeno mediceo possiamo ricavarci la latitudine della nostra nave (φ) e dalle effemeridi l'angolo orario del pianeta riferito a Greenwich (T) nonché la sua declinazione (δ) per quell'ora:

$$\varphi = 43^{\circ}31'42'' \qquad T = 20^{\circ}09.4' \qquad \delta = 13^{\circ}25.1'N$$

A questo punto non resta altro che attendere, osservando costantemente con il cannocchiale il pianeta, che si verifichi il fenomeno sopra descritto. Appena osserviamo spuntare il satellite sul disco di Giove sappiamo che a Greenwich sono le 04h13m21s.

Adesso misuriamo, con un apposito strumento,⁶⁷ l'altezza (h) del pianeta:

$$h=50^{\circ}09.5'$$

Qualora non si abbia a disposizione un sestante è possibile ricavarsi l'altezza del pianeta con un software di mappe astronomiche nel seguente modo:

inseriamo i dati della nostra posizione e dell'ora in cui si verifica il fenomeno mediceo;

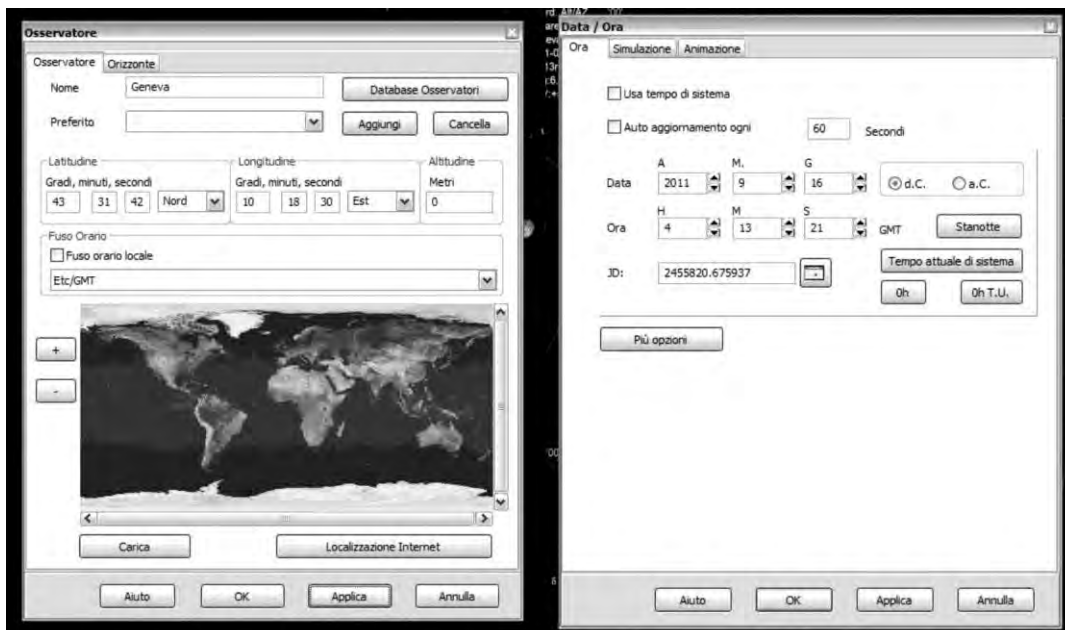


Fig. 12

⁶⁷ Quadrante, balestriglia o sestante.

il software ci mostrerà la mappa del cielo relativa a quell'istante e a quella posizione attraverso un'immagine (in questo caso il pianeta si trova al centro dell'immagine in basso);

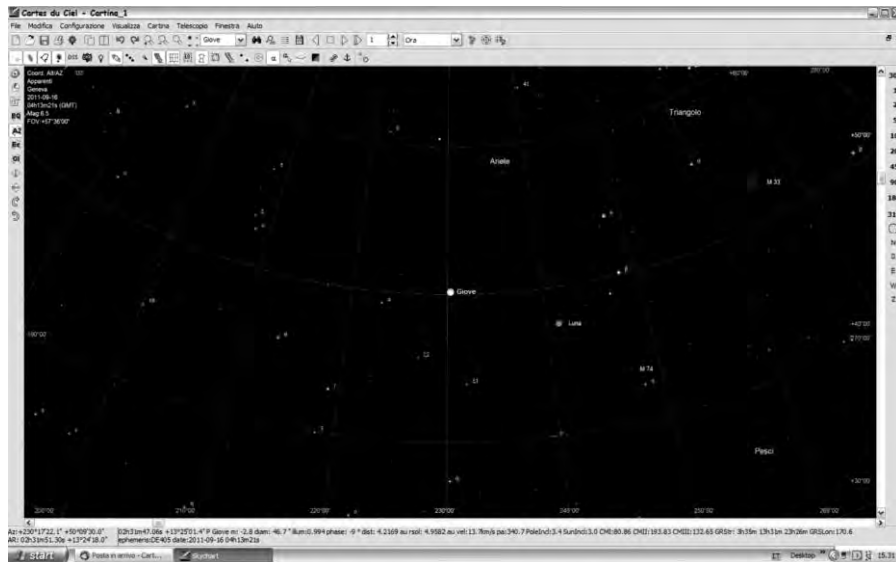


Fig. 13

Nel software Skychart le coordinate altazimutali possono essere lette in basso a sinistra;

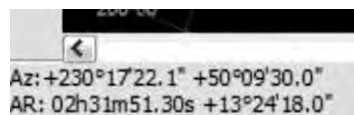


Fig. 14

Misuriamo quindi un azimuth di 230° e un'altezza di $50^\circ 09' 30''$.

Con le formule di Eulero ci ricaviamo l'angolo al polo:

$$\cos \hat{p}_w = \frac{\text{sen} \delta - (\text{sen} \delta \cdot \text{sen} \varphi)}{\cos \delta \cdot \cos \varphi} = \frac{\text{sen} 50^\circ 09' 30'' - (\text{sen} 13^\circ 25' 06'' \cdot \text{sen} 43^\circ 31' 42'')}{\cos 13^\circ 25' 06'' \cdot \cos 43^\circ 31' 42''} = 0,86210902$$

Considerando che l'azimuth del pianeta è 230° possiamo affermare che l'angolo al polo abbia pedice Ovest.⁶⁸ Sapere questo ci permette di ricavare l'angolo orario con la seguente relazione:

$$\hat{p}_W = t$$

Per cui:

$$t = \hat{p}_W = \cos^{-1} 0,86210902 = 30^\circ 26' 44,59''$$

una volta ricavato t con la semplice relazione:

$$\lambda = t - T = 30^\circ 26' 44,59'' - 20^\circ 09' 24'' = 10^\circ 17' 20,59'' \approx 10^\circ 17,4'E$$

ci ricaviamo la longitudine, sappiamo quindi che all'ora UT 04:13 la nostra posizione è:

$$\varphi = 43^\circ 31' 42'' N$$

$$\lambda = 010^\circ 17' 24'' E$$

con errore di 1,1 primi verso ovest.

⁶⁸ L'angolo al polo si misura da 0° a 180° verso est o verso ovest a partire dal mezzo cielo superiore, quindi se l'azimuth è inferiore a 180° l'angolo al polo sarà est, se è superiore sarà ovest. Inoltre l'angolo orario si misura da 0° a 360° a partire dal mezzo cielo superiore per cui se l'angolo al polo è Ovest coincidono, altrimenti vale la relazione: $360^\circ - \hat{p}_E = t$

Conclusione

Il premio di 20.000 sterline alla fine venne consegnato, non senza difficoltà, a John Harrison per l'invenzione del cronometro. Fu quello il punto di svolta dal quale l'arte della navigazione prese un'altra direzione; con l'invenzione delle navi a propulsione meccanica di metà ottocento i viaggi durarono sempre meno, le navi erano sempre più veloci e si cercarono metodi per rendere più rapida la determinazione delle coordinate. Il comandante Thomas H. Sumner (1807-1876) ebbe l'intuizione del cerchio di altezza: un nuovo luogo di posizione che permette di non fare più osservazioni separate per la latitudine e la longitudine. Inoltre l'invenzione del sestante e il miglioramento dei cronometri resero i calcoli più precisi e si passò da un errore di circa 1800Nm commesso da Vespucci alla fine del '400 ad un errore di poche miglia d'inizio '900.

Il percorso per arrivare alla Nuova Navigazione Astronomica fu lungo e travagliato, fatto di piccoli passi partendo da Galileo e Werner fino ad arrivare al capitano americano Thomas H.Sumner e alla retta d'altezza St.Hilare. Il metodo di Galileo, nonostante non venisse utilizzato in mare, ha dato un contributo essenziale alla navigazione: la stipulazione di carte nautiche più precise e la conoscenza più approfondita della geografia del mondo resero senza dubbio la navigazione più sicura.

Bibliografia

- ❖ AA.VV,
Enciclopedia UTET;
- ❖ Ideale Capasso, Istituto Idrografico della Marina,
Storia della Nautica;
- ❖ Aldo Nicoli, Del Bianco Editore,
Navigazione Astronomica;
- ❖ Dava Sobel, Biblioteca Universale Rizzoli,
Longitudine;
- ❖ N. Doderò, P. Baroncini, R. Manfredi, Ghisetti e Corvi editore,
Moduli di lineamenti di matematica modulo B;
- ❖ Giunti Editore,
Atlante del Cielo;
- ❖ Paul Couderc, Garzanti Editore,
Le tappe dell'astronomia;
- ❖ Riccardo Fava, Il Frangente,
Le proprietà nautiche della carta di Mercatore;
- ❖ Richards Graeme, I sempre blu,
Osservazioni con il sestante.