

Società Italiana di Archeoastronomia

Atti del
VI Congresso di Archeoastronomia, Storia dell'Astronomia Antica,
Astronomia culturale e Astronomia Storica

Università degli Studi del Molise
Dipartimento di Scienze Economiche, Gestionali e Sociali
Campobasso, 22 - 23 settembre 2006

A cura di
Elio Antonello

INDICE

Presentazione	pag. 1
<i>Elio Antonello</i>	
Prefazione. Ricordo di Alberto Masani e Vittorio Castellani	pag. 3
<i>Elio Antonello</i>	
Rallentamento secolare della Terra. Raccordo tra diversi metodi per la stima del suo valore	pag. 5
<i>Sigfrido Leschiutta e Patrizia Tavella</i>	
La scienza astronomica in E.A. Poe	pag. 23
<i>Ennio Badolati</i>	
Il “caso” della nebulosa di Andromeda	pag. 29
<i>Francesco Castaldi</i>	
Regiomontano e dal Pozzo Toscanelli, artefici della rinascita dell’astronomia nel mondo occidentale	pag. 43
<i>Franca De Angelis Mangianti, Cesare Mangianti e Letizia Buffoni</i>	
La cosmologia settecentesca e gli interessi astronomici di Gregorio Piccoli del Faggiol	pag. 53
<i>Massimo Tinazzi</i>	
L’equazione di Hill nella teoria del moto lunare	pag. 67
<i>Ennio Badolati e Teresa Boccia</i>	
Sulla convergenza del determinante di Hill	pag. 79
<i>Sandra Ciccone</i>	
Sulla posizione nel moto iperbolico	pag. 91
<i>Marina Morici</i>	
La serie di Kapteyn in meccanica celeste	pag. 99
<i>Donato Di Iorio</i>	
Sull’insieme di convergenza della serie di Lagrange nella Meccanica Celeste	pag. 107
<i>Pasquale Lavorgna</i>	
La fenice svelata: nuova interpretazione astronomica di un mito millenario	pag. 113
<i>Giuseppe De Cesaris</i>	
Le meridiane di Larinum antiche e moderne	pag. 123
<i>Napoleone Stelluti</i>	

RALLENTAMENTO SECOLARE DELLA TERRA

Raccordo tra diversi metodi per la stima del suo valore

SIGFRIDO LESCHIUTTA^o e PATRIZIA TAVELLA*

Politecnico di Torino^{o}*

*Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica**

1. Introduzione
2. Conseguenze civili del rallentamento della Terra
3. Prime ipotesi ed interpretazioni
4. I principi e le tecniche di misurazione, tutte con orologi atomici
5. Satelliti speciali per geodesia e per la misura del rallentamento
6. Prove del rallentamento secolare della Terra
 - 6.1. *Prove paleontologiche*
 - 6.2. *Prove storiche*
 - 6.3. *Considerazioni di fisica*
 - 6.4. *Misurazioni attuali*
7. Osservazioni finali

1. Introduzione

Da circa due secoli si parla di un rallentamento della velocità di rotazione della Terra, fenomeno che prima fu ipotizzato e che invece da circa mezzo secolo viene regolarmente misurato.

Gli scopi di questa nota sono quattro:

- Un breve panorama sulle conoscenze attuali del fenomeno, con le conseguenze “civili”, e le implicazioni sulle Scale di Tempo
- Un riassunto delle prime ipotesi,
- Le tecniche attuali di misura,
- Le prove, alcune delle quali paleontologiche ed altre di epoca storica sul rallentamento e sulla costanza o meno del rallentamento.

In questa nota, che riprende ed amplia una precedente degli stessi autori, citata con il riferimento (31), le citazioni tra parentesi tonde sono le note a piè di pagina, quelle tra parentesi quadre si riferiscono alla Bibliografia.

2. Conseguenze civili del rallentamento della Terra

La constatazione che la Terra rallentasse di circa 1 s all'anno provocò circa trenta anni or sono tutta una serie di conseguenze: ci si accorse che le variazioni del tempo dovute alla

polodia¹ e quelle dovute alle variazioni stagionali², scomparivano dinanzi agli effetti del rallentamento secolare della Terra che è, sia pure con variazioni non predicibili, appunto dell'ordine di 1 secondo all'anno, circa 2,5 - 3 ms al giorno.

La messa in evidenza di questo fenomeno e la sua misura sono dovuti al progressi della Metrologia del Tempo ed in particolare ai maser con Idrogeno ed ai campioni con fascio di cesio, coadiuvati da nuove metodologie e nuovi sistemi di misura, basati anche sull'uso di satelliti.

La scoperta del fatto comportò l'adozione di una nuova scala di tempo, il cui intervallo³ era quello fornito dai campioni al cesio, ma la data veniva alterata di un secondo intero in certi momenti prefissati, allorché la differenza tra la posizione angolare della Terra e l'ora indicata dagli orologi atomici tendesse a superare 0,9 s.

Dato che la Terra "ritarda", la pratica consiste nell'inserire un secondo, nello stesso momento, in tutti gli orologi campione del Mondo.

Nacque così la pratica del secondo intercalare che risolse il problema di compensare in qualche modo la differenza che nasceva tra l'ora data dagli orologi atomici, e l'ora rappresentata dalla posizione angolare della Terra. Naturalmente questa modifica comportò tutta una serie di accordi tra le varie Unioni scientifiche e tutte le autorità nazionali e sopranazionali interessate al tempo.

La situazione è rappresentata nella Fig.1, per il periodo dal 1958 al 2002; inizialmente sino al 1972, si cercò con continue correzioni di frequenza di fare in modo che i segnali emessi dalle stazioni campione seguissero l'ora rappresentata dalla posizione angolare della Terra.

Nel 1972 venne introdotta la pratica del secondo "intercalare", con la inserzione, quando necessario, ma a data fissa di un secondo intero⁴. A data fissa, per non creare sconcerto tra gli utenti che, ove si accorgessero di un salto nella lettura di scala, possano capire che si tratta di un salto intenzionale. La differenza analitica che viene seguita è [UT1 (tempo astronomico rotazionale, quale osservato, corretto per gli effetti della polodia⁵) meno TAI (tempo atomico internazionale)]. Quando questa differenza scende verso 0,7-0,9 s, si introduce un salto di un secondo intero; si veda anche la nota (13) e per la nomenclatura delle Scale di tempo si veda verso la fine di questa sezione 2.

La situazione è oggi radicalmente cambiata perché la classe degli utenti che usava il tempo (i segnali di tempo) come tempo rotazionale e cioè come un angolo o differenza di longitudine, (marinai, topografi, piloti, astronomi) è scomparsa, nel senso che l'ora viene resa accessibile in maniera capillare dai sistemi satellitari di navigazione e dagli orologi piezoelettrici o da quelli atomici. Il secondo intercalare verrà probabilmente soppresso ed un comitato internazionale sta faticosamente prendendo questa decisione, faticosamente

¹ Con valori tipici nella scala del millisecondo; si veda anche la nota 5.

² Con valori di picco di poche decine di millisecondi.

³ Per *intervallo di scala* si intende la distanza temporale tra il segnale di un secondo e quello del secondo successivo; questo intervallo di scala è un secondo SI.

⁴ Questa pratica è del tutto analoga a quella del giorno intercalare o bisestile, la cui introduzione si rese necessaria perché l'anno dura 365,25 giorni circa e quindi, come tutti sanno, ogni quattro anni si deve inserire un giorno.

⁵ La polodia è dovuta il movimento dell'asse istantaneo di rotazione della Terra, che percorre una traccia grosso modo circolare, non predicibile sulla calotta artica. Spostandosi il Polo, si sposta la rete dei paralleli e dei meridiani e quindi variano le coordinate di ogni punto della Terra ed infine l'ora rotazionale..

perché le classi di utenti da convincere sono numerose ed aborriscono solitamente da ogni cambiamento.

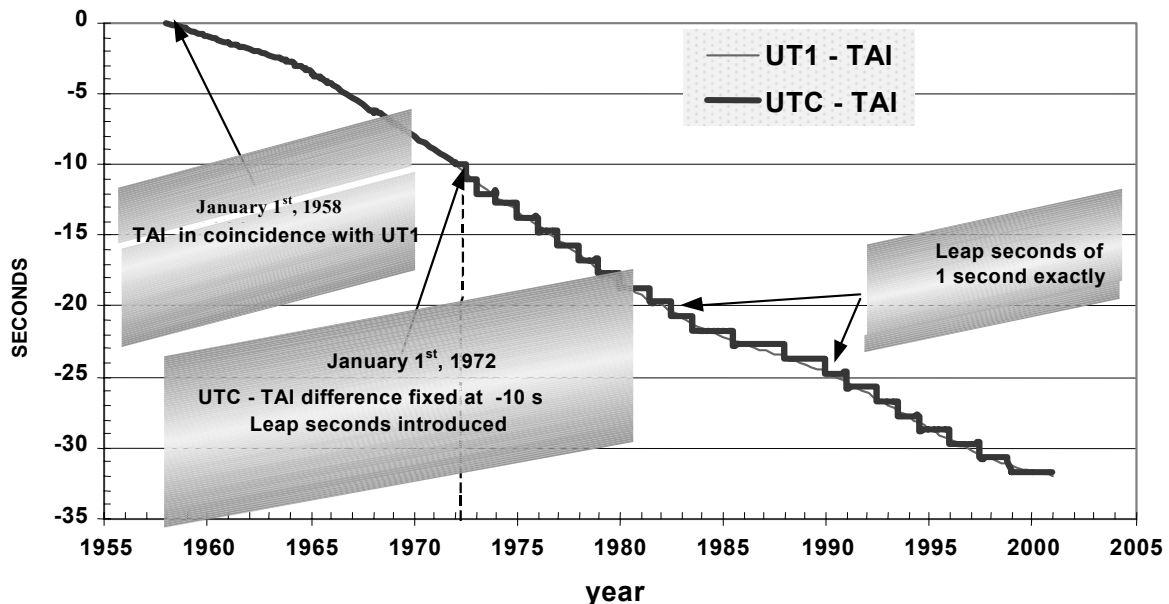


Fig.1. Dalla figura si deduce che il rallentamento è discontinuo, ma presenta comunque un termine grosso modo costante, attorno un secondo all'anno.

Quindi è corretto affermare che il rallentamento secolare della Terra ha oggi anche delle conseguenze sulla vita civile.

La conseguenza più rilevante della scoperta e della misura del rallentamento è appunto l'introduzione di questi salti, in una scala che altrimenti dovrebbe essere uniforme.

La scala di tempo risultante è chiamata (in tutte le lingue) UTC, Tempo Universale Coordinato. Per convenzione internazionale [1] emessa dalla UIT – Unione Internazionale per le Telecomunicazioni, ed accettata anche dalla Unione Internazionale di Astronomia e dalla Unione Internazionale di Geodesia e Geofisica, e da altri Enti Scientifici ed Amministrativi, i nomi ed i relativi acronimi delle scale di tempo rotazionali (basate cioè su rotazione e rivoluzione della Terra) sono ricavati dalla lingua inglese, quelli delle scale di tempo fisiche dal francese. Pertanto la scala di tempo atomico internazionale, viene indicata per tutte le lingue del mondo come TAI, da Temps Atomique International e quella coordinata Universal Time Co-ordinated, UTC.

Si presti attenzione al fatto che l'aggettivo “coordinato” non ha alcuna connotazione relativistica: non si parla infatti di *coordinata temporale* ma si vuole mettere in evidenza che un certo numero di Laboratori di Metrologia con i relativi servizi di segnali campione, si sono tra di loro *coordinati*, nel senso che i segnali di tempo sono all'origine e in senso newtoniano, *sincroni*. Ciò significa che per il generico utente è indifferente prelevare un segnale di tempo da una qualsiasi delle stazioni coordinate.

3. Le prime ipotesi ed interpretazioni

Andando indietro nel tempo, si ha la sensazione che anticamente il problema del rallentamento non si ponesse, nel senso che pur senza avanzare particolari ipotesi, il periodo di rotazione della Terra era genericamente ritenuto fisso e costante. Se ne preoccupa Tito Livio Burattini (1635? – 1690?), un fisico, metrologo e uomo d'affari, nativo di Agordo, in provincia di Belluno, e per molti anni attivo in Polonia.

Il Burattini⁶ si interessò di sistemi di misura in un suo libro intitolato *Il metro cattolico*, comparso nel 1675 presso la tipografia italiana dei Padri francescani a Vilnius. In questo libro si presentano i vantaggi di un sistema di misura basato tutto⁷ su un campione di lunghezza rappresentato dalla lunghezza del pendolo che batte il secondo. Il Burattini non poteva ancora sapere che questa lunghezza dipende dalla latitudine. Comunque il Burattini ritiene che la Terra giri a **velocità costante** e che un giorno duri, ovviamente, 86 400 secondi.

Nel secolo successivo Fontenelle⁸ nel suo *Entretien sur la pluralité des mondes*⁹ del 1686 sostiene che “Non mi meraviglierei se la Terra rallentasse, anzi è probabile lo faccia”, e con altre parole dice che in fondo la Terra è una grossa trottola e che tutte le cause che possono alterare sul moto di una trottola, possono alterare il moto della Terra.

La stessa ipotesi viene presentata da Immanuel Kant (1724-1804) che, contrariamente a quanto si crede, era soprattutto un professore di geodesia e geografia, il quale nel suo *Allgemeine Naturgeschichte und Theorie des Himmels* del 1755 sostiene che la Terra ritarda di almeno, o circa, 1 secondo al secolo. Chi prepara queste note non è in grado di fornire elementi sui ragionamenti seguiti di Kant.

Attorno al 1940 vennero messe in evidenza delle insospettite variazioni stagionali nel periodo di rotazione della Terra, mentre per arrivare ad una misura del rallentamento che ci interessa, chiamato anche rallentamento secolare, si deve attendere la nascita di un nuovo tipo di orologio atomico, il Maser con Idrogeno, e nuove tecniche di osservazione astronomica, come si vedrà nella prossima quarta sezione.

4. Le tecniche attuali di misura

Il principio di misura è relativamente semplice: si tratta di individuare nello spazio ed all'esterno alla Terra, un sistema di riferimento che si presume sia fisso ed immutabile, l'antico riferimento delle stelle fisse¹⁰. Si individui poi un riferimento Terrestre, un meridiano solidale pertanto alla Terra e che quindi ruota di 2π radianti ogni giorno. Se la Terra ritarda, la distanza angolare tra il piano del meridiano terrestre e la direzione fissa

⁶ S.Leschiutta: Tito Livio Burattini, un metrologo dimenticato del '600, *Il Giornale di Fisica*, Vol. p. 19

⁷ Lunghezza, superficie, tempo basate sul pendolo; per la massa si ipotizzava una costanza del valore della densità dell'acqua, che riempiva un certo volume. Il Burattini per decine di anni misurò questa densità nei fiumi della Polonia e raccomanda di usare l'acqua piovana, dopo un lungo periodo di piogge.

⁸ Bernard Le Bovier De Fontenelle (1657-1757).

⁹ Il libro del Fontenelle è stato tradotto con il titolo “Conversazioni sulla pluralità dei Mondi” da E.Cocanari, Edizioni Teoria, Roma-Napoli, 1984. La traduzione reca un commento ed una introduzione di C. Rosso.

¹⁰ Questo riferimento è oggi ottenuto con le tecniche interferometriche applicate sui segnali radioelettrici provenienti da una radiosorgente posta in qualche galassia.

nello spazio, oltre ai 2π radianti, aumenta di una quantità che deve essere determinata. Questa quantità attorno questi anni, all'inizio del ventunesimo secolo, aumenta di circa 2,54 ms al giorno.

Questo rallentamento corrisponde ad uno scarto di frequenza relativo della frequenza di rotazione della Terra di circa $-3 \cdot 10^{-8}$.

Il problema non è facile, ma è stato risolto in più modi, tanto è vero che esiste un Ente internazionale, lo International Earth Rotation Service (IERS), con sede a Parigi, con il compito di misurare la durata di ogni giorno e quindi di misurare la velocità di rotazione della Terra.

Con i dati raccolti coi cinque metodi più oltre indicati, lo IERS pubblica con cadenza giornaliera il valore osservato della lunghezza del giorno. Notizie sulle attività dell'IERS ed in particolare sul valore corrente della lunghezza del giorno (questo parametro è chiamato LOD- length of day) sono fornite al sito www.iers.org.

4.1. I cinque metodi Radioelettrici utilizzati dall'IERS (International Earth Rotation Service) per studiare la velocità di rotazione della Terra

I metodi vengono qui solo elencati, fornendo al più una sintetica notizia; si tenga comunque presente che la velocità di rotazione della Terra solitamente è uno dei numerosi parametri che possono essere ricavati dalle grandezze osservate; sono i programmi di calcolo che consentono di ricavare di volta in volta le grandezze desiderate, pur operando sugli stessi dati sperimentali.

4.1.1. VLBI - VERY LARGE BASE INTERFEROMETRY

Si tratta di effettuare osservazioni contemporanee di radiointerferometria in stazioni dotate di maser con idrogeno come orologio locale¹¹. La quantità che si osserva è la fase di segnali radioelettrici in microonda, quale osservata in punti remoti sulla superficie della Terra nei confronti dell'orologio locale, emessi da radiosorgenti nello spazio; le quantità che si ricavano sono:

- le direzioni di provenienza dei segnali emessi dalle radiostelle,
- lo spostamento relativo delle stazioni¹² lungo la superficie terrestre, misurando così la velocità della deriva dei continenti con risoluzione dell'ordine del centimetro all'anno,

¹¹ La stabilità della frequenza e quindi della fase di questi orologi (10^{-15}) per la durata di alcune ore e la durata delle osservazioni (da 1000 a 3000 secondi) sono tali da consentire di ritenere che gli orologi delle singole stazioni siano tra loro sincroni, a meno di un termine costante, per tutta la durata della misura. In questo luogo ha senso parlare di interferometria nei confronti di uno stesso segnale fittizio, anche se ottenuto in località remote da due distinti Maser con Idrogeno. In pratica i dati si raggruppano lungo una retta, se lo scarto di frequenza tra gli orologi delle due stazioni è costante, attorno una parabola ove esista una variazione costante di frequenza. La durata della misura non può essere estesa a piacimento, in particolare ove le stazioni siano a rilevante distanza lungo i paralleli; è infatti necessario che la sorgente sia contemporaneamente ed adeguatamente "sopra" l'orizzonte per ambedue le località. Inoltre l'antenna non può funzionare in posizione sub-orizzontale, perché il suo lobo raccoglierebbe il rumore della Terra che, elettromagneticamente, è un oggetto "caldo".

¹² Con questa applicazione si misura la deriva dei continenti in modulo ed in direzione.

- la velocità angolare della Terra¹³,
- l'ammontare e la direzione della polodia¹⁴.

In Italia, misure di questo tipo vengono effettuate dall'Istituto Nazionale di Radioastronomia nelle stazioni di Medicina, Noto, ed una in costruzione in Sardegna, e dalla Agenzia Spaziale Italiana nella stazione di Matera; negli stati Uniti esiste il National Earth Orientation Service.

4.1.2. LUNAR LASER RANGING - LLR

Come è ben noto, sulla superficie della Luna sono stati depositati dalle missioni degli americani od automatiche russe, dei pannelli di retroriflettori, che vengono interrogati da Terra da alcune stazioni: francese, a Grasse, CERGA Centre Etudes et Recherches Géodynamiques, Francia, presso l'Observatoire cote d'Azur; americana, osservatorio di Haleakala nelle isole Hawaii, ed un osservatorio russo in Crimea.

Si inviano impulsi laser, che dopo riflessione vengono raccolti da un telescopio; il tempo totale di volo viene determinato con un orologio atomico: la quantità misurata è la distanza della stazione dal pannello sulla Luna, dal cui valore e variazioni si determinano numerose grandezze, come l'ammontare dell'allontanamento della Luna dalla Terra e la stabilità nel tempo della costante universale di gravitazione G.

4.1.3. GLOBAL POSITIONING SYSTEM - GPS

Il noto sistema di navigazione satellitare GPS, anche se i satelliti non sono ideali come forma e superfici per essere considerati satelliti geofisici, può essere usato per determinazioni di Geodesia e Geofisica. I satelliti, con riferimento alla tabella che sarà presentata al punto 5, sono comunque "alti", numerosi, dotati di campioni atomici a bordo, al punto da costituire delle sorgenti ideali per le tecniche chiamate di Quasi-VLBI, nelle quali le misurazioni, indicate al punto 4.1.1, possono essere effettuate in numerosissime stazioni, con risoluzioni ragguardevoli e con trattamento dei dati quasi immediato; non si tratta infatti di estrarre informazioni dai deboli segnali di radiostelle, che radioelettricamente possono essere definiti come dei rumori, ma da segnali coerenti (nascono da campioni atomici) ed incomparabilmente più intensi, dato che provengono da alcune decine di migliaia di chilometri e non da una galassia remota.

Non sono soprattutto necessarie le grandi antenne paraboliche ed orientabili, del diametro di alcune decine di metri; è sufficiente infatti una antenna fissa della superficie di pochi decimetri quadrati. In Italia si stima che i ricevitori GPS di tipo geodetico, adatti cioè ad effettuare misure interferenziali, siano almeno un centinaio.

Le informazioni che si possono ricavare sono le stesse fornite dal VLBI.

¹³ Si considera lo spostamento, nel tempo, della proiezione della *linea di base*, il segmento che unisce il centro di fase delle due antenne che sono solidali con la Terra, proiettato sul piano dell'equatore.

¹⁴ Si considera lo spostamento nel tempo della proiezione della *linea di base*, il segmento che unisce il centro di fase delle due antenne, che sono solidali con la Terra, proiettato sull'asse di rotazione terrestre. Una variazione di questa proiezione fornisce lo spostamento del Polo (come differenza di latitudine), lungo il meridiano della stazione. Le due stazioni non sono mai sullo stesso meridiano, ma questo problema è risolvibile con un po' di trigonometria.

4.1.4 SATELLITE LASER RANGING - SLR

Una decina di satelliti geodetici, sferici, passivi e rivestiti di retroriflettori¹⁵, è dedicata unicamente a determinazioni di distanza. La grandezza misurata è la distanza dalla stazione terrestre, che è nota, ad un certo satellite, ad una certa ora. Combinando opportunamente questi dati viene ricavata per archi l'orbita di un satellite. Lo spostamento del piano orbitale fornisce direttamente la posizione angolare della Terra rispetto ad un piano di riferimento e quindi la grandezza desiderata. Osservazioni del genere sono effettuate presso la stazione di Matera della Agenzia Spaziale Italiana.

4.1.5 DORIS

E' un satellite geodetico lanciato dall'Institut Géographique National francese, nel quale sono state usate varie tecniche di misura radioelettriche di tipo Doppler e non, con trasponditori attivi a bordo. L'orbita del satellite e le frequenze usate sono state determinate in modo da consentire la determinazione accurata dei vari fattori che sono causa di incertezze; ad esempio, il ritardo dovuto al passaggio dei segnali attraverso la ionosfera, la cui correzione dipende dalla distanza in frequenza tra le portanti che convogliano a Terra lo stesso segnale, viene reso bene calcolabile emettendo lo stesso segnale a frequenze attorno a 2 ed a 8 GHz.

Il Doris tra tutti i satelliti geodetici è quello che consente le migliori misure per la determinazione dell'orbita. Il rallentamento della rotazione terrestre anche in questo caso viene determinato dallo spostamento del piano orbitale; in pratica si usano quattro metodi radioelettrici diversi, lo spostamento di frequenza doppler di una portante emessa dal satellite, lo spostamento doppler di una portante emessa da Terra e che vi ritorna dopo essere transitata attraverso il satellite, confronti di fase sulle portanti emesse, misura del tempo di transito, andata e ritorno, di un codice numerico di tipo quasi aleatorio¹⁶ sovrapposto alle portanti.

¹⁵ Il retroriflettore è una combinazione di tre specchi montati ortogonalmente tra di loro. Questa combinazione riflette nella direzione di provenienza dei fotoni in arrivo. I satelliti sono rivestiti di retroriflettori, le cui geometrie sono ben note nei confronti del centro di massa del satellite. Un impulso laser proveniente da Terra viene così riflesso verso la stazione trasmittente, che è munita di un telescopio ottico per raccogliere i fotoni di ritorno. Un contatore elettronico, pilotato da un orologio atomico, misura il tempo totale di volo; è immediato quindi ricavare la distanza tra stazione e satellite. I catarifrangenti usati nelle biciclette e sulle autovetture, sono, scientificamente parlando, dei retroriflettori o dei catadiottri.

¹⁶ Un codice quasialeatorio è una successione di impulsi che, esaminati entro una determinata finestra temporale hanno una cadenza aleatoria e quindi le caratteristiche di un rumore bianco, ma che dopo un certo intervallo di tempo si ripetono ordinatamente. Sull'uso di codici quasialeatori sono basati anche i sistemi commerciali di navigazione satellitare. Il vantaggio di questi codici risiede nel fatto che ogni codice si comporta come un segnale bianco per tutti gli altri codici, mentre, oltre un certo intervallo, il codice si ripete e quindi, avendone la chiave, può essere decodificato. Decisivo vantaggio risiede nel fatto che più codici di questo tipo, detti tra di loro ortogonali, possono transitare *contemporaneamente* attraverso il ripetitore del satellite senza, in linea di principio, danneggiarsi od interferire; ognuno infatti si comporta come un rumore bianco per gli altri segnali. Il nome di ortogonale si giustifica nel senso che la correlazione incrociata o mutua tra i singoli codici è volutamente molto bassa. In questo modo si può determinare la distanza del satellite da più stazioni terrestri caratterizzata ognuna da un codice che le è riservato e misurando il tempo di volo con un orologio atomico. La posizione del satellite ad esempio, è ottenuta per trilaterazione geometrica da tre stazioni, situate in posizioni note, la cui distanza dal satellite può essere determinata nello stesso istante, con risoluzioni dell'ordine del centimetro. Si segue solitamente un altro metodo che è quello di avere un modello analitico dell'orbita, nel quale si "forzano", si impongono cioè le misure laser di distanza.

5. Satelliti speciali per geodesia e per lo studio dei parametri legati alla rotazione della Terra

Esistono satelliti speciali per osservazioni di geodesia; questi satelliti devono approssimare un punto materiale e, possibilmente, non avere dei pannelli esterni o delle antenne, siano soprattutto simmetrici e di superficie regolare, ad es. una sfera, al fine di essere soggetti solo alle forze di gravità, evitando le pressioni di radiazione dovuta al sole od alla albedo proveniente dalla Terra. Inoltre dovrebbero essere posti ad una altezza tale che i residui attriti atmosferici siano trascurabili; per questo motivo è opportuno che siano densi e pesanti¹⁷.

Pertanto questi satelliti devono o dovrebbero essere:

- piccoli
- pesanti e quindi densi
- sferici, senza pannelli
- con superficie uniforme
- passivi¹⁸
- di lunga vita (“alti”)¹⁹
- possibilmente ruotanti²⁰
- inclinazione dell’orbita nota e voluta,
- prima del volo, calibrati otticamente e con il centro di massa “coincidente” con il centro di figura²¹

Alcuni satelliti per geodesia

Altezza approssimativa km

Stella e Starlette	700 - 1000	Francia
Lageos-I e Lageos-II	5000	Stati Uniti - Italia
Etalon-I – Etalon-II	19 000	Russia

I residui modello-osservazione per Lageos-I e Lageos-II sulla distanza da Terra sono 14 mm e 16 mm, rispettivamente.

Altri satelliti oggetto di determinazioni Laser sono:

GFZ 400 km $i=52^\circ$
ERS-2 785 km $i=98,5^\circ$
Topex-Poseidon 1335 km $i=66^\circ$
GPS 35 e 35 (Stati Uniti)
Glonass 64 e 67 (Russia)
AJISAI (Giappone)

¹⁷ Per questo motivo, alcuni di questi satelliti hanno il nucleo in Uranio 238.

¹⁸ Per non avere variazioni di massa nel tempo dovute agli apparati radio ed alle loro alimentazioni.

¹⁹ Per poter trascurare o ridurre le collisioni con la atmosfera residua; da 4000 a 12000 km la vita utile è stimata in alcune migliaia di anni, ed è legata alle degradazioni ottiche dei retroriflettori che sono esposti all’ambiente spaziale ove sono presenti dei micrometeoriti, che provocano delle abrasioni sulle facce dei retroriflettori, chiamati anche “triedi trirettangoli”.

²⁰ Per evitare effetti termici e quindi meccanici se il satellite “vedesse” il sole sempre con la stessa faccia.

²¹ Ove il centro di figura non coincidesse con il centro di massa, la rotazione del satellite avverrebbe attorno il centro di massa, provocando una indesiderata modulazione nella distanza.

6 Prove sul rallentamento secolare della Terra

Oltre alla fondamentale osservazione che la velocità di rotazione della Terra deve rallentare perché esiste tutta una serie di meccanismi di dissipazione di energia, (alcuni bene identificati, come l'attrito delle maree dei mari "bassi"²², altri meno) che frenano la rotazione; anche nella ipotesi che il momento angolare della Terra si conservi, è comunque necessario che la Terra a lungo termine rallenti.

Nascono allora due curiosità, la prima è sull'ammontare della coppia frenante e dei suoi effetti, la seconda se esistano altre prove del fenomeno che non siano basate sugli orologi atomici.

La astronomia basata sugli orologi meccanici e piezoelettrici non può fornire una risposta, perché questi orologi venivano periodicamente corretti sulla scorta di osservazioni astronomiche legate al tempo di transito di un astro quale osservato da Terra. Gli effetti dovuti alla rotazione venivano quindi correttamente interpretati come un errore dell'orologio.

Lo stesso fenomeno si verificò nel 1935 quando l'astronomo Nicola Stoyko al Bureau International de l'Heure a Parigi ed attorno il 1940 quando i metrologi del tempo Scheibe e Adelsberger del Physikalisches Technisches Reichsanstalt -PTR- di Berlino, si accorsero indipendentemente di fatti strani che avvenivano per il periodo di rotazione della Terra.

A Parigi, ove confluivano le osservazioni di tutti gli osservatori astronomici del mondo, completate dalle date e dall'ammontare delle correzioni praticate sui pendoli astronomici, Stoiko si accorse che indipendentemente dalla posizione geografica dell'osservatorio, sembrava che pendoli meccanici di tipo diverso e mantenuti in condizioni ben controllate, avanzassero o ritardassero tutti assieme: non erano pertanto gli orologi a presentare delle variazioni comuni, ma il comune riferimento costituito dalla rotazione della Terra.

A Berlino gli orologi piezoelettrici del PTR misero in evidenza che i dati astronomici degli strumenti dei passaggi, presentavano rispetto agli orologi piezoelettrici e su un periodo di due tre anni degli andamenti sinusoidali annui inesplicati che potevano essere interpretati come variazioni stagionali della velocità di rotazione della Terra.

Questo fenomeno portò la UAI (Unione Astronomica Internazionale) a definire un tempo chiamato UT2, come correzione da aggiungere alla correzione chiamata TU1, dovuta alla polodia. Chiamando UT0 la osservazione astronomica, si aveva pertanto:

$$UT=UT0 + UT1+UT2.$$

La correzione UT1, come è ben noto, può essere grosso modo modellata (ma solo a posteriori), ma non estrapolata, e può essere ricavata unicamente mediante osservazioni della polodia, in passato ricavate con i dati delle cinque stazioni del Servizio Internazionale Rapido delle Longitudini²³, ed ora dalle misure VLBI, SLR, Doris, di cui al punto precedente.

²² Per mari "bassi" si intendono estensioni marine rilevanti per superficie, come il golfo del Messico od il Mar Giallo, e profondi "solo" un centinaio di metri, nei quali l'onda della marea, che è controrotante rispetto alla Terra, può esercitare sul fondo del mare una coppia frenante, inesistente negli oceani.

²³ Si trattava di cinque stazioni poste tutte al parallelo 39° 8'.

Il servizio era basato su cinque stazioni, poste nominalmente alla stessa latitudine, che osservavano con lo stesso tipo di strumento e con lo stesso programma osservativi, la altezza al meridiano di alcune stelle. Anche l'Italia partecipò a questo sforzo con la stazione di Carloforte nell'isola di San Antioco, nelle vicinanze della Sardegna, per il periodo dal 1899 al 1979. La vicenda scientifica, politica ed umana che portò alla nascita di questo servizio nel mondo ed al suo sviluppo in Sardegna, sono illustrati in un articolo facilmente reperibile del Prof. E. Proverbio²⁴, oltre che nel sito di Carloforte.

Il servizio è ora svolto da una cooperazione internazionale che prende il nome di *International Polar Motion Service* (I.P.M.S.), con sede presso l'Osservatorio Astronomico di Parigi.

Esistono numerose prove e valutazioni di questo rallentamento, alcune delle quali sono considerate nel volume edito da Rosenberg e Runcorn [4] che raccoglie dati su osservazioni di carattere paleontologico e di paleoastronomia.

6.1. Qualche numero sulla Terra che rallenta

Non è questa la sede nemmeno per accennare ad un argomento che è estremamente complesso, con ramificazioni in numerosi campi di studio, ma si ritiene comunque interessante presentare qualche cifra, al fine di valutare la dimensione dei problemi e delle grandezze coinvolte. Un quadro generale si trova alla voce "Terra", da p. 207 a p.231 in [2] e nel libro di Scalera [3]. I valori numerici sono stati dedotti dal libro citato con [4] dal quale sono state ricavate tutte le Figure presentate, meno la Fig.1.

La massa della Terra è stimata ammontare a $5,97 \cdot 10^{24}$ Kg, con un volume di $1,083 \cdot 10^{21}$ m³. Questo enorme oggetto sferico di raggio medio di $6,370 \cdot 10^6$ m, ruota con una velocità angolare pari a 72,92 nanoradiani al secondo e presenta, non ostante dimensioni e massa, delle variazioni della velocità di rotazione con spettri molto diversi ed anche degli spostamenti dell'asse istantaneo di rotazione.

Dei numerosi processi dissipativi, quello meglio conosciuto è quello dovuto alle maree, che controrotano rispetto alla Terra. La Fig.2 fornisce una idea di questo fenomeno. Le attrazioni, soprattutto di Luna e Sole, provocano due rigonfiamenti sul mare che sono allineati con le masse perturbanti, controrotano rispetto alla Terra che, nel disegno, ruota in senso antiorario. I rigonfiamenti sono due, quello dalla parte della Luna è ovvio, quello dalla parte opposta nasce dal fatto che chi si sposta dalla parte della Luna è il nucleo della Terra. La retta che passa tra i due rigonfiamenti ruota con una differenza di fase di circa 3°, rispetto alla congiungente tra le masse della Terra e della Luna.

Nascono due coppie, una che frena la Terra, ed è quella dalla quale nasce il rallentamento che oggi, come si vedrà, misuriamo agevolmente, l'altra che sottrae energia alla Luna che si allontana dalla Terra. La velocità di questo allontanamento è stimata essere di circa un millimetro all'anno e viene misurata come visto al punto 4.1.2 - 4.

²⁴ E. Proverbio: L'organizzazione del Servizio internazionale delle Latitudini: il contributo italiano, *Giornale di Fisica*, Vol. XXXVII.N°3, p.167-178, 1996.

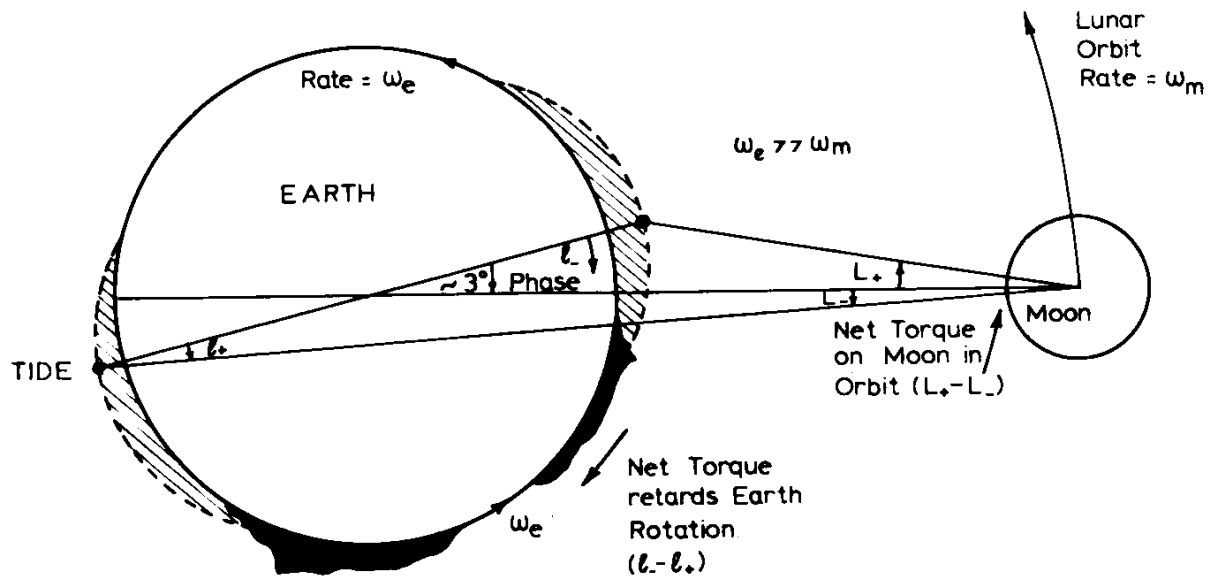


Fig. 2. Relazioni geometriche tra i rigonfiamenti dovuti alle maree e le coppie trasferite a Terra e Luna.

Esistono numerose stime sull'ammontare della coppia frenante, ma tutte convergono nella stima che detta coppia debba essere compresa tra 5 e $9 \cdot 10^{+16}$ Nm, solitamente il valore che si vede più frequentemente citato è di $7 \cdot 10^{+16}$ Nm. Questa coppia, applicata ad un corpo come la Terra, equivale ad una dissipazione di circa 6 TW; il terawatt corrisponde a 10^{12} watt e comporta una decelerazione di circa $5 \cdot 10^{-22}$ rad sec $^{-2}$.

6.2 Prove paleontologiche

Nel già citato libro [4] vengono fornite numerose prove paleontologiche, tra le quali colpiscono quelle effettuate su conchiglie bivalvi sia contemporanee sia fossili. Analoghi fenomeni per taluni coralli²⁵. E' stato così possibile ricavare la durata di una lunazione in varie età geologiche, anche contemporanee, allevando conchiglie con condizioni di luce alterate, in maniera da simulare lunazioni con un diverso numero di giorni²⁶. Questi ritmi di crescita sono molto sensibili alle condizioni nelle quali la conchiglia si sviluppa²⁷ o viene allevata, ma comunque può essere messo in evidenza il fenomeno di interesse, che è il numero di giorni di una lunazione.

Alcune conchiglie della famiglia Pecten, alla quale appartengono le *coquilles San Jacques*²⁸, care alla gastronomia, presentano una crescita veloce (4-5 cm in alcuni mesi) e

²⁵ R.W.Buddemeir, R.A. Kinzie III : The chronometric reliability of contemporary Corals, [4], 135-147.

²⁶ G.R. Clark II : Periodic Growth and Biological Rhythms in experimental Grown Bivalves, [4], p.103-110.

²⁷ J.W.Evans : Growth and Micromorfology of two Bivalves exhibiting non-daily Growth lines, [4], p.119-134.

²⁸ Nella iconografia religiosa, san Giacomo, che andò pellegrino a Compostella, porta appesa al mantello una di queste conchiglie, oltre a sollevare la estremità sinistra del manto, per far vedere la piaga della lebbra. Era consuetudine, infatti, che tutti i pellegrini, lebbrosi o meno, del santuario di San Giacomo di

regolare (uno strato di carbonato di calcio al giorno) e consentono di determinare sia l'età della conchiglia, sia la velocità di crescita e quindi il numero dei giorni durante una lunazione. Lo spessore dei singoli strati si riduce nell'evento della luna nuova; è così possibile usare la conchiglia come un orologio e ricavare il numero di strati tra una lunazione e quella successiva

Studiando coralli, conchiglie, spessori di sedimenti lacuali, è stato possibile ricavare la tabella seguente:

Durata di un mese lunare (espressa in giorni attuali)

<i>Periodo</i>	<i>Milioni di anni fa</i>	<i>Durata</i>
Proterozoico remoto	900	25,0
Proterozoico vicino	600	26,2
Carbonifero	300	28,7
Neozoico	oggi	29,5

Analogamente, il numero dei giorni in un anno nel proterozoico remoto sono stimati in 490 e nel devoniano 440. Tutto questo nella ipotesi, che sembra ragionevole, presso gli esperti, che la durata di un anno sia rimasta costante.

Altre valutazioni del numero di giorni in un anno e della durata del mese lunare, sono state ricavate accettando l'ipotesi della espansione della Terra²⁹, che porta ad un aumento del momento di inerzia della Terra e quindi ad un suo rallentamento[6].

Si ripete il suggerimento per chi fosse interessato all'insieme di questi fenomeni, di consultare il testo "Growth Rhythms and the History of the Earth's Rotation", a cura di Rosenberg e Runcorn [4], che è una miniera di notizie e nel quale, su una trentina di lavori, ben 10 riguardano fenomeni che si osservano nei molluschi. Tra questi lavori, esauriente e ben documentata è la nota di Pannella³⁰.

Un affascinante panorama interdisciplinare delle relazioni tra Terra e Luna può essere trovato in [5], che raccoglie gli Atti di una Conferenza svoltasi a Padova, presso la Accademia Galileiana di Scienze, Lettere ed Arti, nel 2000. Quel Convegno fu organizzato da Cesare Barbieri e da Francesca Rampazzi, della Università di Padova. Nel volume citato si forniscono³¹ dati sull'uso della Luna per ricavare informazioni della differenza di longitudine tra punti terrestri e per studi sulla rotazione della Terra.

Tra le letture suggerite esiste il già citato testo di Scalera, [3] con una notevole iconografia, e dedicato prevalentemente alla Terra, pubblicato a cura dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia.

6.3 Prove storiche

Dalle note lasciate dai cronisti cinesi, arabi e dai monaci medioevali emerge un fondamentale ed accurato metodo per determinare di quanto si sia allungato il giorno. Dai

Compostela, portassero a casa alcune conchiglie di questa famiglia, raccolte sulla spiaggia dell'oceano Atlantico.

²⁹ G. Scalera : Terra in Espansione, p.228-231, in [].

³⁰ G.Pannella: Palaeontological Clocks and the History of the Earth's Rotation, in [4], p253-284.

³¹ S.Leschiutta e P.Tavella : Reckoning time, Longitude and the History of the Earth's Rotation, using the Moon, [5]. p. 225-236.

cronisti si ricava dove e quando si sia osservata una eclisse³². Molti cronisti descrivono anche le modalità della eclisse ed alcuni fanno capire se l'eclisse sia stata totale (abbiamo visto le stelle...) e danno una indicazione di quando (giorno e ora) il fenomeno si sia verificato.

Mediante un calcolatore è possibile ricostruire la fascia della totalità rispetto al suolo e dal confronto della longitudine delle località nella quali l'eclisse è matematicamente passata, nella ipotesi che le velocità della Terra sia rimasta costante, e della longitudine del luogo di osservazione, è immediato ricavare di quanto sia rallentata nel frattempo la Terra³³.

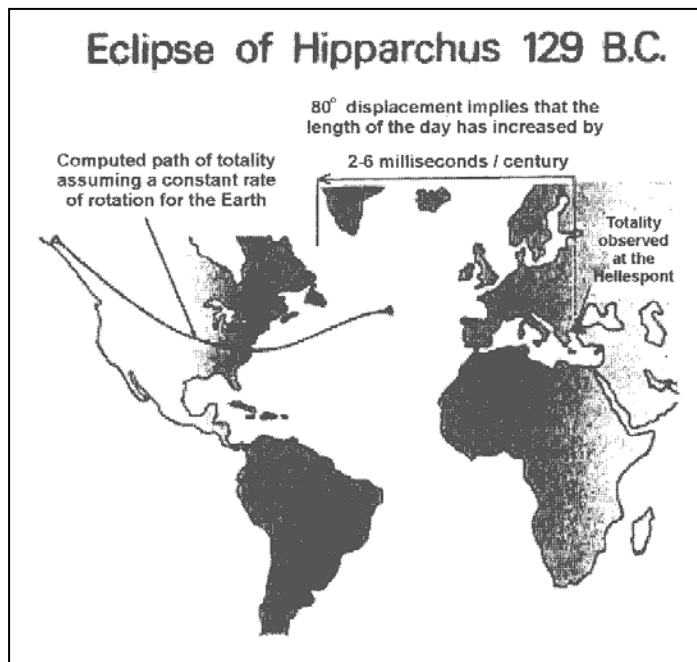


Fig. 3. Viene ricostruito il percorso reale, ove la Terra avesse girato a velocità costante ed indicato il luogo di osservazione.

Questo metodo è illustrato con tre casi; il primo, Fig. 3, si riferisce ad una eclisse osservata da Ipparco in Asia Minore nell'Ellesponto, nel 129 A.C., mentre il calcolo fornisce il percorso della totalità, ove la Terra, da Ipparco in poi, avesse ruotato a velocità costante. A parità di latitudine, la differenza tra il percorso calcolato e quello osservato è di circa 80°.

Un secondo caso si riferisce ad una eclisse avvenuta nel 136 A.C.. La eclisse fu osservata in Babilonia mentre avrebbe dovuto transitare sulle isole Britanniche, sempre nella ipotesi che la Terra avesse girato negli scorsi circa 2100 anni con velocità costante.

³² F.R. Stephenson : Historical Eclipses and Earth's rotation, Cambridge University Press, Cambridge, 1997.

³³ S.K.Runcorn : Paleontological and Astronomical Observations on the Rotational History of the Earth and Moon, [4], p. 285-291.

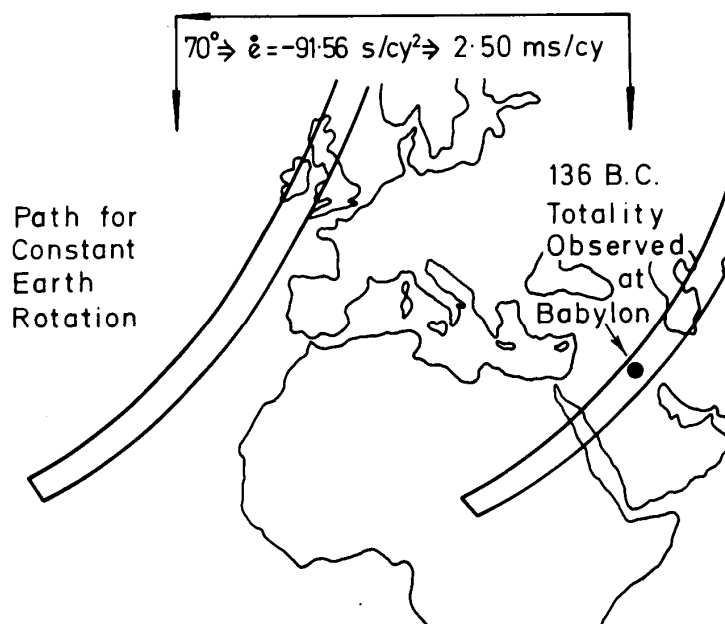


Fig.4. Una eclisse del 136 A.C. a Babilonia, ma che avrebbe dovuto transitare nella fascia a sinistra, sulle isole britanniche.

Nel terzo caso, si presentano i transiti di una eclisse solare avvenuta il 22 Agosto del 1039 D.C.

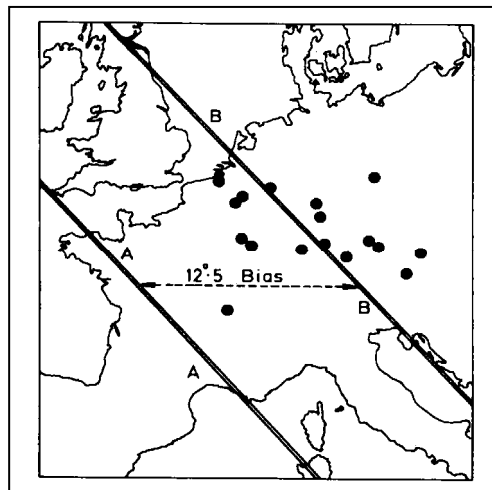


Fig. 5. Transito di un'eclisse solare avvenuta il 22 agosto 1039 d.C.

Si ricavano due informazioni. La prima è la differenza tra la linea A, il passaggio teorico, e quella B, che passa per i luoghi ove l'eclisse è stata annotata; tra le due rette esiste un intervallo corrispondente a $12,5^\circ$ di differenza in longitudine.

La seconda informazione riguarda i luoghi di osservazione e si può notare un effetto del numero di persone e del loro acculturamento in funzione delle regioni.

La nota di Muller e Stephenson, sempre in [4], fornisce numerosi esempi di osservazioni astronomiche³⁴.

Il metodo delle “eclissi”, quella storica e quella matematica, è inoppugnabile e non ambiguo, ma può essere verificato solo per alcune decine di casi, perché non sempre è possibile verificare con ragionevole certezza una eclisse.

Il grafico della Fig. 6 confronta infine osservazioni “antiche”, arabe, cinesi, medioevali e, nell’angolo superiore destro, con linea sottile, i dati “moderni”, ricavati con il metodo VLBI.

Si constata che, su un arco di 2600 anni, i dati sono allineati, che i dati “arabi” attorno il 1100 D.C. sono congrui con quelli “babilonesi” osservati 1200 anni prima, che il rallentamento dovuto alle maree ha la stessa pendenza di quello ricavato dalle osservazioni astronomiche.

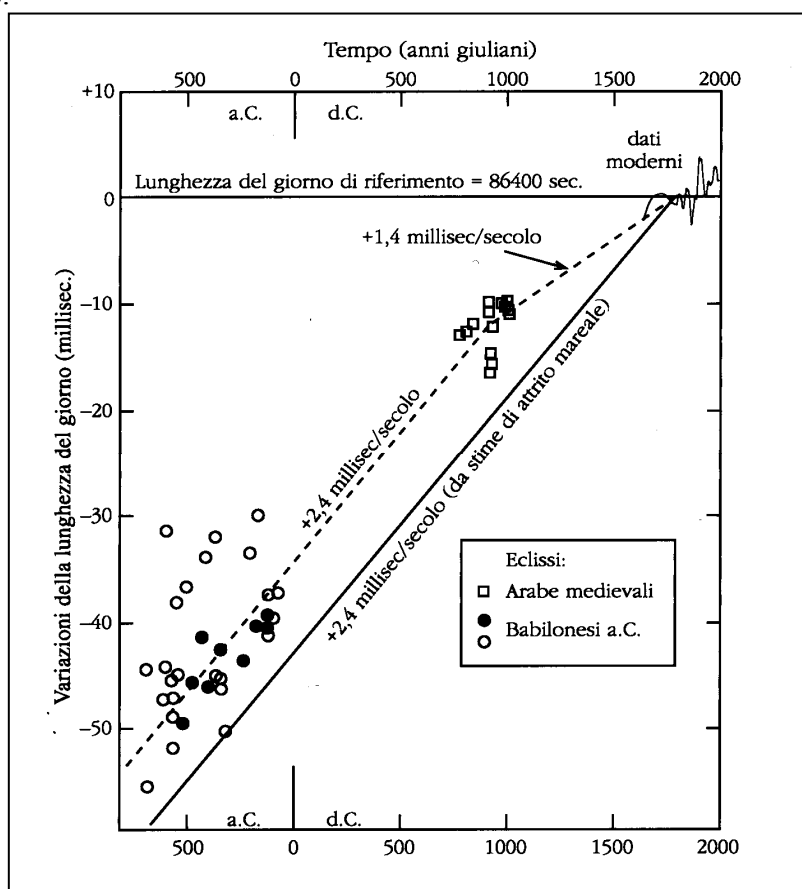


Fig. 6. Confronto delle stime della variazione della lunghezza del giorno

Si può dedurre che per gli scorsi 2600 anni il rallentamento, proporzionale alla pendenza delle rette, è stato pressoché costante ed è attribuibile prevalentemente all’azione frenante delle maree.

³⁴ P.M. Muller, F.R. Stephenson : The acceleration of the Earth and the Moon from Early Astronomy ; [4], p. 459-533.

7 Osservazioni finali

Si può concludere che:

- le variazioni del momento angolare della Terra,
- della coppia frenante,
- del momento di inerzia,

possono essere valutate o calcolate mediante

- dati paleontologici,
- osservazioni astronomiche antiche e contemporanee,
- considerazioni geofisiche sull'attrito delle maree,
- misurazioni con satelliti artificiali ed orologi atomici.

I dati paleontologici sono estremamente utili perché consentono di valutare il momento angolare e quello d'inerzia per finestre temporali remote, per le quali non esistono altri metodi.

La conclusione più importante è che, pur tenendo conto della eterogeneità dei dati e delle loro relative incertezze, sembra emergere che :

- il rallentamento è sempre esistito, più o meno alterato, almeno per molte (almeno nove) centinaia di milioni di anni,
- per almeno gli ultimi tremila anni, il rallentamento sia stato pressoché costante e misurabile,
- attualmente, con satelliti ed orologi atomici, questi fenomeni vengono misurati facilmente e con ridotte incertezze,
- comunque queste incertezze e risoluzioni mettono in evidenza fenomeni inaspettati,
- comunque esistono fluttuazioni notevoli,
- ulteriori ricerche dovrebbero essere effettuate sulla stabilità nel tempo di G e di altre costanti fondamentali e, soprattutto,
- il soggetto è affascinante, per il suo combinare, allo scopo di ricavare un valore di $\Delta\omega / \omega$ circa eguale a $3 \cdot 10^{-8}$, con ω velocità angolare della Terra, dati paleontologici, osservazioni di biologia, antichissime e recenti, osservazioni di speciali satelliti, tavolette babilonesi e le transizioni atomiche dell'idrogeno e del cesio.

In altri termini ci troviamo dinanzi ad un elegante e classico caso di ricerca interdisciplinare.

BIBLIOGRAFIA.

- [1] F.Cordara e Mannucci: Misurare il Tempo e la Frequenza. Il Rostro, Milano, 1997.
- [2] Autori vari, Enciclopedia delle Scienze Fisiche, Vol.VI. Sup-Z, alla Voce Terra, Istituto della Enciclopedia Italiana, Roma, 1995.
- [3] G. Scalera: I moti e la forma della Terra, Istituto Nazionale di Geofisica, Roma, 1999.

- [4] G.C. Rosenberg e S.K. Runcorn: Growth Rhythms and the History of The Earth's Rotation, John Wiley & Sons, London, 1975.
- [5] C. Barbieri e F. Rampazzi: Earth, Moon, and Planets. Special Issue: Earth-Moon Relationships, Vol. 85-86 . Nos. 1-3, Kluver Academic Publishers, Doordrecht, 1999.
- [6] G. Scalera e K-H. Jacob: Why expanding Earth?, Technische Universitaet, Berlin e Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Roma, 2003.

TORINO, MAGGIO 2007