

Sul legame tra astronomia e geologia

Elio Antonello

INAF-Osservatorio Astronomico di Brera

SIA-Società Italiana di Archeoastronomia

elio.antonello@inaf.it

Riassunto. Nella breve nota si riassumono alcuni dei risultati principali della proficua interazione tra astronomia e geologia: da un lato, l'astronomia permette una migliore risoluzione temporale della stratigrafia, e dall'altro lato la geologia permette una verifica delle teorie e modelli astronomici sul lunghissimo periodo.

Introduzione

Negli anni scorsi a Sassari abbiamo avuto occasione di parlare di astronomia e paleoclimatologia, e, riassumendo il lavoro di centinaia di ricercatori nelle varie discipline, avevamo concluso che la storia stessa della nostra evoluzione umana e delle civiltà umane è dipesa in qualche modo dagli effetti astronomici sul clima, in particolare dalle lente variazioni dei parametri orbitali terrestri (ANTONELLO 2018a, 2018b, 2020). Il convegno di oggi è l'occasione per ricordare la relazione molto vantaggiosa tra astronomia e geologia, una relazione che, per il tramite della paleoclimatologia, in un certo senso giustifica l'importante conclusione sopra ricordata.

Dinamica e insolazione

Nel Sistema Solare il moto dei corpi è regolato dalle loro mutue interazioni gravitazionali, e di conseguenza i parametri dell'orbita ellittica della Terra cambiano su tempi scala molto lunghi. L'eccentricità dell'orbita varia, anche se di poco, con periodi di centinaia di migliaia di anni (principalmente circa 400 mila e 100 mila anni). L'inclinazione dell'asse di rotazione terrestre rispetto all'asse dell'orbita oscilla di un paio di gradi in circa 41 mila anni. Il piano dell'orbita ruota intorno al Sole (spostamento del perielio), e la combinazione con la precessione astronomica produce la precessione climatica, con periodi tra 19 mila e 23 mila anni. Come noto, la precessione astronomica è legata al movimento 'a trottola' dell'asse di rotazione della Terra in 26 mila anni circa. In pratica, la precessione climatica corrisponde a una rotazione delle stagioni nel corso di migliaia di anni. Oggi la Terra è un po' più vicina al Sole in autunno e inverno, e queste due stagioni sono un po' più brevi della primavera e dell'estate. Diecimila anni fa circa accadeva l'opposto, con la Terra più vicina al Sole in primavera ed estate. Le suddette stagioni si intendono ovviamente boreali (nell'emisfero australe avviene l'opposto). Il piano dell'orbita terrestre, inoltre, oscilla e ruota rispetto al piano medio di riferimento del Sistema Solare, con tempi scala sempre del centinaio di migliaia di anni.

Queste variazioni molto piccole e molto lente dei parametri orbitali cambiano le condizioni di insolazione sulla superficie terrestre nel corso dei millenni, e il sistema del clima terrestre risponde a tali sollecitazioni termiche. Pur essendo in apparenza trascurabili, il fatto che si accumulino in migliaia di anni le porta ad avere progressivamente un loro effetto. Come noto, Milankovitch è stato il ricercatore che ha proposto in modo quantitativo un legame tra l'insolazione e le glaciazioni.

La Figura 1 riporta un esempio di come oscillano lungo due milioni di anni alcuni parametri astronomici: in alto l'eccentricità, in mezzo la precessione climatica, e in basso c'è la conseguente variazione di insolazione a mezzogiorno in estate ad alte latitudini (dati: BERGER

1992). Per l'eccentricità si vede il periodo di 100 mila anni modulato da uno di 405 mila anni; ce ne sono comunque anche altri di ampiezza più piccola. Tutti questi periodi si ottengono da un'analisi con tecniche di Fourier: cioè, queste curve si approssimano con serie trigonometriche, dove ogni termine ha una frequenza, o periodo (che è l'inverso della frequenza), e ha un'ampiezza. La curva della precessione climatica, nel pannello centrale, mostra un'oscillazione molto grande quando l'eccentricità è maggiore, e l'oscillazione è piccola quando l'orbita è praticamente circolare. L'insolazione varia in un modo analogo. Da un confronto con i dati paleoclimatici si vede che, mediamente, gli effetti climatici sono più forti quando l'eccentricità è più alta (l'orbita è più ellittica).

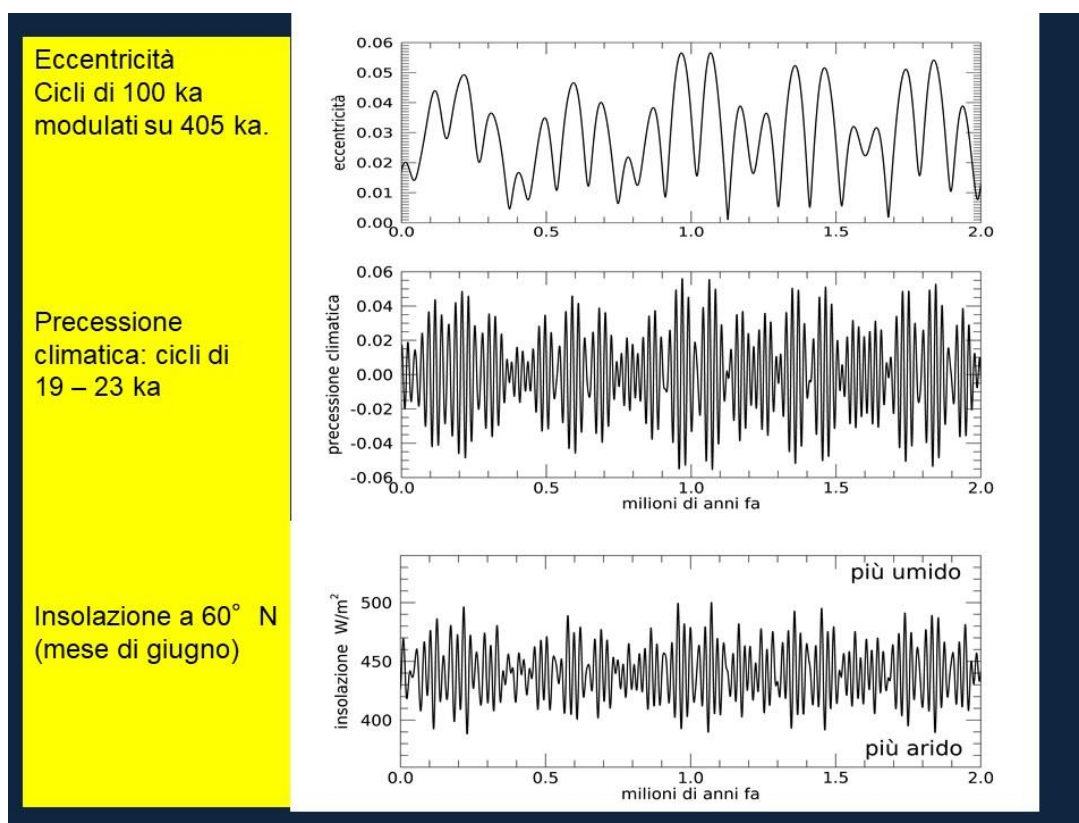


Fig. 1. Andamento dell'eccentricità, della precessione climatica e dell'insolazione negli ultimi due milioni di anni (dati da BERGER 1992).

Negli ultimi decenni le variazioni cicliche climatiche e ambientali sono state sempre meglio identificate nelle stratificazioni geologiche: la natura del materiale portato dai fiumi negli oceani e dei depositi dei microrganismi oceanici, accumulati nei millenni e compressi in roccia dall'attività geologica, risente del clima esistente all'epoca della formazione. A questo proposito, dei begli esempi sono i depositi marini sollevati e piegati dall'attività geologica osservati a Zumaia in Spagna, o in varie località in Sicilia.

Gli stessi periodi di variazione della maggior parte dei parametri astronomici cambiano lentamente nel tempo, e milioni di anni fa erano un po' più corti. Il motivo è l'interazione mareale tra la Terra e la Luna: per dissipazione mareale la Terra e la Luna si allontanano e la Terra rallenta la sua rotazione, infatti milioni di anni fa la durata del giorno era più breve di oggi. Un'altra conseguenza è la variazione della costante di precessione astronomica: un tempo il ciclo precessionale era più breve (la costante era maggiore). Il periodo di circa 405 mila anni dell'eccentricità, invece, si mantiene stabile nel tempo perché l'interazione Terra-Luna non ha un grande effetto su di esso, e, come diremo, è regolato dal pianeta Giove, che ha una grande massa e ha un'orbita stabile (altri periodi dell'eccentricità, come quello di circa 100 mila anni, variano leggermente).

In questo contesto, è opportuno tenere presente che il periodo di rivoluzione della Terra intorno al Sole e il semiasse maggiore dell'orbita terrestre si devono considerare stabili, cioè in prima approssimazione invarianti. L'eccentricità varia perché cambia il semiasse minore. In altre parole, l'interazione con gli altri corpi del sistema solare avviene con uno scambio di momento angolare che tende a far variare la caratteristica della rivoluzione terrestre da un'orbita con eccentricità pressoché nulla (orbita circolare) di perimetro massimo a orbite più ellittiche con perimetro inferiore.

Un sistema caotico

Il Sistema Solare, anche se è stabile, ha una dinamica caotica. In particolare, chi ha studiato la dinamica della Terra trova che a distanza di circa 60 milioni di anni le soluzioni dei calcoli astronomici cominciano a essere piuttosto diverse tra loro pur partendo da condizioni iniziali che differiscono pochissimo. La conclusione è che gli astronomi non sono in grado di sapere quale è stata la vera orbita molti milioni di anni fa.

Il comportamento caotico dell'orbita terrestre è dovuto soprattutto agli effetti gravitazionali degli asteroidi Cerere e Vesta (LASKAR et al. 2011a). Gli incontri ravvicinati tra gli asteroidi inducono un forte comportamento caotico nelle loro rispettive orbite, per cui il loro moto risulta non più prevedibile, e a causa della loro influenza gravitazionale sulla Terra, anche se è apparentemente infima e trascurabile, non è possibile trovare l'evoluzione con precisione dell'orbita terrestre oltre alcune decine di milioni di anni fa. Si tratta cioè di effetti piccolissimi, ma che si manifestano dato il loro accumularsi su intervalli temporali molto lunghi. Di conseguenza, visto che la stratigrafia geologica 'registra' i parametri orbitali della Terra grazie ai loro effetti sul paleoclima, astronomi e geologi si sono chiesti se l'analisi dei dati paleoclimatici fosse in grado di dire qualcosa di utile sulla dinamica orbitale reale. La risposta è stata affermativa.

Astronomia, paleoclimatologia e geologia

Negli ultimi anni il gruppo di Olsen ha iniziato lo studio sistematico e accurato di vari siti geologici al fine di ottenere risposte molto più precise, con il progetto *Geological Orrery*. OLSEN et al. (2019) ricordano che, nell'ambito della meccanica classica, in linea di principio si potrebbe ricostruire tutto il passato e prevedere tutto il futuro. Tuttavia questo determinismo non è valido per il Sistema Solare, non a causa dei limiti nella nostra conoscenza esatta dei parametri iniziali, ma piuttosto per il limite fondamentale dato dalla natura caotica del Sistema. Ciò significa che non c'è speranza di ricostruire con precisione la storia del Sistema Solare sulla base della conoscenza del presente. Al contrario, i dati geologici possono fornire indicazioni sui parametri orbitali effettivi centinaia di milioni di anni fa. Ma per far questo sono necessari dati stratigrafici molto accurati, ed è un punto cruciale.

Dall'analisi dei dati stratigrafici si risale alle componenti periodiche presenti, e queste si confrontano con i periodi principali dei parametri orbitali, ricavati dall'analisi dei risultati dell'integrazione delle equazioni della dinamica relativa all'orbita terrestre. L'origine dei periodi dei parametri e delle loro combinazioni è fatta risalire all'effetto dei pianeti (che hanno il loro specifico periodo orbitale). Riporteremo alcuni esempi nelle Figure 2 e 3, ricavati dai lavori di LASKAR et al. (2004). I termini $g_1, g_2, \dots$ e le loro differenze indicano le frequenze indotte dall'interazione anche con gli altri pianeti sull'eccentricità terrestre. I termini $s_1, s_2, \dots$ e le loro differenze indicano le frequenze indotte sull'obliquità terrestre. I numeri 1, 2, ... identificano il pianeta cui si riferisce una frequenza. Le frequenze principali che si rilevano nella curva dell'eccentricità sono indicate con la lettera ' e_i ', e sono elencate in ordine di ampiezza decrescente. Come si vede, il periodo di 405 mila anni dipende da Venere e Giove. La serie trigonometrica mostra anche la presenza di importanti termini di combinazione delle frequenze di base (modulazioni), cosa che è sempre presente nei fenomeni non lineari

complessi. Nella variazione di obliquità le frequenze principali sono indicate con 'oi', e 'p' è la precessione astronomica; sono state indicate anche le principali frequenze di combinazione (modulazioni). Il periodo corrispondente di 173 mila anni è molto stabile (per effetto di Saturno).

		Frequenze secolari: come varia l'eccentricità dell' orbita terrestre (Laskar et al. 2004) frequenze principali ("/yr) e periodi $e_a = g_2 - g_5$ 3.2 405 kyr $e_b = g_4 - g_5$ 13.6 95 $e_c = g_4 - g_2$ 10.4 124 $e_d = g_3 - g_5$ 13.1 99 $e_e = g_3 - g_2$ 9.9 130 modulazioni $e_b - e_d = g_4 - g_3$ 0.5 2.5 Myr	Frequenze secolari: come varia l'obliquità terrestre (Laskar et al. 2004) p = precessione astronomica frequenze principali ("/yr) e periodi $o_a = p + s_3$ 31.6 41 kyr $o_b = p + s_4$ 32.7 40 $o_c = p + s_6$ 24.1 54 modulazioni $o_a - o_c = s_3 - s_6$ 7.5 173 kyr $o_b - o_a = s_4 - s_3$ 1.1 1.2 Myr
Mercurio	1		
Venere	2		
Terra	3		
Marte	4		
Giove	5		
Saturno	6		
Urano	7		
Nettuno	8		
Plutone	9		

Fig. 2. Frequenze principali e loro combinazioni presenti nella variazione dell'eccentricità e nella variazione dell'obliquità; periodi in migliaia (kyr) e milioni (Myr) di anni.

La stabilità del periodo di 405 mila anni dell'eccentricità è stata verificata in diversi lavori di stratigrafia, in base alla datazione precisa con radioisotopi. Di conseguenza, questo periodo è oggi utilizzato come 'metronomo' per scandire il 'tempo' dei geologi, come, per esempio, nei diversi casi in cui la bassa risoluzione temporale della stratigrafia non permette invece una datazione precisa. Anche la stabilità del periodo di 173 mila anni dell'obliquità è stata verificata.

		Risonanze secolari (Laskar et al. 2004) $(s_4 - s_3) - 2(g_4 - g_3)$ circa 0 oggi transizione da $(s_4 - s_3) - (g_4 - g_3)$ circa 0 tra 50 e 100 Myr fa. Cioè il periodo corrispondente a $(g_4 - g_3)$ dovrebbe essere variato passando da 2.4 Myr all'attuale 1.2 Myr. Quando, precisamente?
Mercurio	1	
Venere	2	
Terra	3	
Marte	4	
Giove	5	
Saturno	6	
Urano	7	
Nettuno	8	
Plutone	9	

Fig. 3. Risonanza secolare tra le frequenze principali s_4 , s_3 , g_4 e g_3 ; periodi in milioni (Myr) di anni.

C'è un altro legame di risonanza significativo tra le frequenze principali. LASKAR et al. (2011), e anche altri autori, hanno notato che la combinazione di frequenze mostrata in Figura 3 è 'in

librazione', e dovrebbe essere variata in qualche epoca tra 50 e 100 milioni di anni fa. Oggi la differenza $(s_4-s_3) - 2*(g_4-g_3)$ è prossima a zero, mentre un tempo lo era la differenza $(s_4-s_3) - (g_4-g_3)$; quindi il periodo corrispondente alla differenza (g_4-g_3) deve essere passato da 2.4 milioni di anni a 1.2 milioni di anni. Gli autori considerano molto importante la verifica di questo effetto mediante i dati geologici, perché sarebbe un punto fermo nello studio teorico della dinamica della Terra. In uno lavoro recente, MA et al. (2017; ma i risultati sono da considerarsi preliminari) hanno trovato effettivamente una transizione tra 86 e 90 milioni di anni fa, però trovano anche un ritorno alla situazione precedente in un'epoca più recente, cosa non prevista dai calcoli.

Come già detto, sono misure di stratigrafia estremamente delicate, per cui sono necessarie molte conferme con ulteriori studi. E questo è uno degli scopi del *Geological Orrery*, come è stato chiamato. Orrery è il termine inglese per indicare un planetario meccanico; prende il nome dal conte di Orrery, una delle prime persone a costruirli in Inghilterra nel Settecento. Lo scopo del programma di OLSEN et al. (2019) è molto ambizioso: capire la stabilità del Sistema Solare; definire curve climatiche per qualsiasi epoca, con una precisione temporale migliore di 20 mila anni; migliorare la precisione delle misure di meccanica celeste; avere dei riferimenti per capire la storia climatica degli altri pianeti; tarare costanti di decadimento dei radioisotopi, perché queste sono note solo con una certa precisione; determinare valori del termine nel potenziale gravitazionale del Sole, legato alla distribuzione della densità, che dipende dalla rotazione interna del Sole; calibrazione delle stime di esistenza nel tempo di esopianeti simili alla Terra; e infine, fare addirittura dei test delle teorie della gravitazione, cioè la relatività generale e le teorie alternative ad essa, test che richiedono appunto misure di effetti molto piccoli accumulati in milioni di anni.

Bibliografia

ANTONELLO E. 2018a, *Astronomia, paleoclimatologia e storia dell'uomo*, in "La misura del tempo. Atti 4°, 5°, 6° Convegno di Archeoastronomia in Sardegna", Cronache di Archeologia Vol. 13, Ed. Mediando p. 23.

ANTONELLO E. 2018b, *Astronomia e paleoclima: il legame tra cielo e uomo*, in "La misura del tempo. Atti 4°, 5°, 6° Convegno di Archeoastronomia in Sardegna", Cronache di Archeologia Vol. 13, Ed. Mediando p. 45.

ANTONELLO E. 2020, *Astronomia, paleoclimatologia, evoluzione umana e delle società umane*, Aracne editrice.

BERGER A. 1992, *Orbital Variations and Insolation Database*, IGBP PAGES/World Data Center for Paleoclimatology Data Contribution Series # 92-007. NOAA/NGDC Paleoclimatology Program, Boulder CO, USA.

LASKAR J. et al. 2011a, *Strong chaos induced by close encounters with Ceres and Vesta*, "Astronomy & Astrophysics", 532, L4.

LASKAR J. et al. 2011b, *La2010: a new orbital solution for the long-term motion of the Earth*, "Astronomy & Astrophysics", 532, A89.

LASKAR J. et al. 2004, *A long term numerical solution for the insolation quantities of the Earth*, "Astronomy & Astrophysics", 428, 261.

MA C. et al. 2017, *Theory of chaotic orbital variations confirmed by Cretaceous geological evidence*, "Nature", 542, 468.

OLSEN et al. 2019, *Mapping Solar System chaos with the Geological Orrery*, "PNAS", DOI: 10.1073/pnas.1813901116, e SIAM Conference: DS19 - MS162-1: *The Geological Orrery: Mapping the Chaotic History of the Solar System using Earth's Geological Record*