

Astronomia, paleoclima ed evoluzione umana

Elio Antonello - INAF Osservatorio Astronomico di Brera
elio.antonello@brera.inaf.it

Abstract: Beginning from the mid of the last century, paleoclimatology studies produced a consistent framework for an explanation of the alternation of long cold climate phases and short warm period (such as the present one of the Holocene) during the past five hundred thousand years. The various proxies, or climate indicators, such as those obtained from ocean and ice core drillings, limnology and palynology, have confirmed the relation of the paleoclimate with the insolation changes predicted by the studies of Earth orbital dynamics. Climatologists generally agree on the importance of the orbital forcing for the long term trend of the climate, and are improving the models to reproduce the complicate behaviour of the climate system. Several anthropologists and archaeologists working in prehistory and proto-history tend to consider such slow climate changes as an important factor in the evolution of our specie Homo sapiens and of the human societies. Therefore, on the basis of the recent results in the various disciplines, we conclude that, in order to comprehend our history, we must take into account astronomy.

Keywords: Paleoclimatology, anthropology, archaeology, orbital forcing.

1. Introduzione

Inizieremo il presente lavoro con una domanda e un'affermazione provocatorie: l'astronomia ha un'importanza fondamentale per la vita umana oppure no? Oggi è realmente indispensabile oppure si può ignorare? Se avesse un'importanza fondamentale, questa non dovrebbe essere solo di tipo culturale-intellettuale.¹ Inoltre, qualche lodevole ricaduta tecnologica in ambito civile, legata al progresso delle tecnologie astrofisiche, non sarebbe sufficiente, essendo una delle tante cose utili della tecnologia contemporanea. Secondo chi scrive, l'importanza fondamentale sta nel fatto che l'andamento del clima a lungo periodo sulla Terra è regolato da parametri astronomici: essi hanno determinato l'evoluzione dell'uomo, hanno pesantemente condizionato quella della società umana, e la condizioneranno anche in futuro. Il fatto è che si tratta di tempi-scala astronomici, per cui noi semplicemente li ignoriamo, in quanto l'impellenza dei problemi quotidiani ci assorbe totalmente. Però, lassù, i cieli

¹ Infatti, per dire che non si tratterebbe di una cosa indispensabile qualcuno potrebbe applicare anche al nostro caso il detto: "con la cultura non si mangia".

sembrano dirci: “Fate pure. Noi, intanto, continuiamo, ineluttabilmente, il nostro moto, con i suoi effetti inesorabili sulla Terra e sul vostro destino.”²

2. Dinamica

La storia della Terra è iniziata circa 4 miliardi e mezzo di anni fa. I fossili dicono che la comparsa nel mare delle prime cellule si ha dopo quasi un miliardo di anni, mentre le prime forme di vita complessa, multicellulare, sono certamente presenti dopo altri tre miliardi di anni circa. (Butterfield 2011) L’evoluzione successiva è stata segnata in particolare da una serie di grandi estinzioni di massa, per le quali non sono da escludere anche delle cause cosmiche o astronomiche, oltre al famoso asteroide i cui effetti avrebbero portato all’estinzione dei dinosauri. Noi ci occuperemo delle ultime centinaia di migliaia di anni, sottolineando il fatto che pressoché tutti gli studiosi concordano sulla dipendenza del paleoclima dai parametri dell’orbita terrestre (eclittica).

L’obliquità, l’eccentricità, la precessione astronomica, il perielio, e lo stesso piano dell’eclittica variano con tempi-scala definiti dagli effetti gravitazionali degli altri pianeti e degli asteroidi, oltreché del Sole e della Luna. Per l’eccentricità i tempi-scala sono molto lunghi, circa 100.000 e 400.000 anni. L’obliquità, cioè l’angolo tra l’asse di rotazione della Terra e quello dell’eclittica (oggi circa 23°), varia di un paio di gradi con periodo di circa 41.000 anni. L’effetto combinato della precessione astronomica³ e del moto degli apsidi (longitudine del perielio) dà origine alla precessione climatica: le stagioni ‘ruotano’ con periodo di circa 19.000 – 23.000 anni. Infine, l’inclinazione del piano dell’eclittica varia, insieme alla longitudine dei nodi, rispetto a quello di riferimento del Sistema Solare.

Le equazioni della meccanica celeste che rappresentano il moto della Terra intorno al Sole sono risolubili mediante metodi numerici e approssimazioni, o per integrazione numerica diretta. Negli ultimi decenni, lavori accurati in tale ambito e finalizzati alla paleoclimatologia sono stati quelli di Berger (1976, 1978). Tra gli sviluppi più recenti si possono ricordare i lavori del gruppo di Laskar *et al.* (2011).

3. Insolazione

Il tramite per collegare la dinamica al clima è dato dall’insolazione, cioè quanta energia solare raggiunge un punto sulla Terra, calcolandone la variazione nel corso dei millenni per una certa data nell’anno e ora del giorno. Si ottengono così delle serie temporali, lunghe anche milioni di anni, e dalla loro analisi si ricavano le periodicità presenti e la rispettiva ampiezza. I termini preponderanti sono quelli dovuti alla precessione

² L’affermazione così espressa ha un vago sentore astrologico; qui però si ha a che fare con effetti concreti, misurabili e misurati.

³ Di solito l’effetto della precessione astronomica (che ha un periodo di circa 26.000 anni) viene descritto con un cerchio perfetto rappresentante il moto medio del Polo Celeste rispetto alle stelle fisse; in realtà, a causa della variazione dell’obliquità, la traiettoria reale del Polo non è un cerchio che si chiude.

climatica e hanno ampiezza decrescente andando dall'equatore ai poli, mentre le ampiezze dei termini legati all'obliquità dell'eclittica crescono allontanandosi dall'equatore. (Berger, Loutre 1994) I termini dell'eccentricità hanno ampiezza piccola; eppure l'effetto cumulativo sul clima appare significativo, perché il sistema-clima risponde in modo fortemente non lineare.

I paleoclimatologi hanno cercato un collegamento con i periodi ricavati dai dati dei *proxies*, cioè gli indicatori climatici intermedi, alcuni dei quali sono illustrati nella prossima Sezione. Secondo Berger e Loutre (1994) si possono certamente studiare situazioni di data, ora e latitudine per quanto riguarda l'insolazione, ma non ci si può limitare a un confronto qualitativo tra i periodi ricavati da questa analisi e quelli osservati nei *proxies*; è necessario costruire modelli adeguati della risposta complicata del sistema climatico terrestre al fine di avere un reale progresso nella sua conoscenza.

Durante l'Ottocento erano state avanzate delle ipotesi sui possibili legami tra l'astronomia e i periodi glaciali che si andavano deducendo dai dati geologici. Milankovitch, negli anni Quaranta del secolo scorso, aveva raccolto in un trattato i suoi studi relativi a questo argomento, proponendo una teoria riguardante il possibile effetto dell'insolazione. Le prime verifiche osservative erano state poi effettuate da Cesare Emiliani, che aveva sviluppato la paleo-oceanografia e gettato le basi metodologiche per gli studi di paleoclimatologia. (Emiliani 1955) Un primo lavoro di riferimento per le conferme e i miglioramenti alla teoria di Milankovitch è quello di Hays, Imbrie e Shackleton (1976).

4. *Proxies*

Esistono parecchi *proxies*, o indicatori intermedi, e qui ne ricorderemo solo alcuni. Cominciamo con i carotaggi dei ghiacci, come quelli effettuati in Antartide. Nelle località con ghiacci 'perenni' ogni anno si forma un nuovo strato di neve, con inclusioni portate dal vento, quali polvere, ceneri (prodotte da vulcani o incendi), pollini. Gli indicatori climatici principali che si ricavano dagli strati sono gli eccessi dell'isotopo di ossigeno (^{18}O) e del deuterio D (isotopo di idrogeno H) contenuti nella molecola dell'acqua, H_2O . L'ossigeno è presente in natura nei tre isotopi stabili, ^{16}O , ^{17}O e ^{18}O , e in condizioni standard le loro percentuali sono 99,763% (^{16}O), 0,037% (^{17}O) e 0,200% (^{18}O). La molecola d'acqua con l'isotopo ^{18}O è un po' più pesante e un po' meno volatile di quella con ^{16}O , e da questa differenza fisica deriva la presenza di percentuali isotopiche leggermente diverse rispetto alle standard, a seconda delle condizioni climatiche e di come si è svolto il ciclo dell'acqua. Ciò che si ricava dalle misure con gli spettrometri di massa è la variazione del rapporto $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ rispetto a un campione standard, espresso in per mille e rappresentato con il simbolo $\delta^{18}\text{O}$; una formula empirica lega poi l'eccesso $\delta^{18}\text{O}$ alla temperatura. Un discorso analogo può essere fatto per il rapporto deuterio/idrogeno, $^2\text{H}/^1\text{H}$ o D/H, e il rispettivo eccesso, espresso come δD . L'andamento degli eccessi isotopici è chiaramente periodico: negli ultimi 400.000 anni si nota un'alternanza di brevi fasi calde come quello attuale (in corso da circa 10.000 anni) e lunghe fasi fredde (Fig. 1).

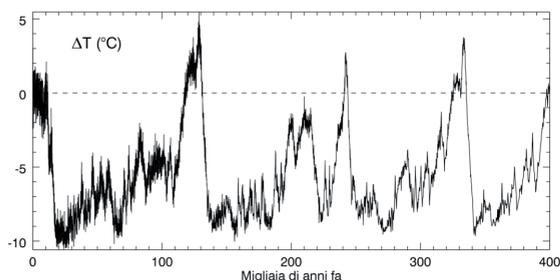


Fig. 1. Andamento della temperatura media in Antartide negli ultimi 400.000 anni, derivata dall'eccesso di deuterio; la variazione è rispetto alla temperatura media attuale (Jouzel *et al.* 2007)

Nel ghiaccio resta intrappolata anche dell'aria, e quindi saranno presenti molecole di vari gas, come ossigeno O_2 e azoto N_2 . Per esempio, Kawamura *et al.* (2007) hanno rilevato che il rapporto O_2/N_2 segue l'andamento dell'insolazione estiva. In altre parole, questo *proxy* non indica tanto il clima, quanto le caratteristiche fisiche legate alle condizioni di insolazione, e perciò risulta molto interessante per la teoria di Milankovitch.

Un altro *proxy* è dato dai carotaggi in acque oceaniche profonde, dove molto materiale è costituito da depositi di foraminiferi.⁴ In questo caso, si studia il rapporto $\delta^{18}O$ per l'ossigeno contenuto nella molecola di carbonato di calcio. I risultati sono uniformi per tutte le latitudini e longitudini dove sono stati effettuati i carotaggi (Lisiecki, Raymo 2005), e l'andamento è simile a quello di δD osservato nei ghiacci in Antartide.

Dall'analisi delle serie di dati dedotti tramite i *proxies* si ottengono sempre come termini principali alcuni o tutti i periodi corrispondenti alle variazioni di insolazione (19.000 e 23.000, 41.000 e circa 10.0000 anni) e alle loro combinazioni non lineari. Ricordiamo che in alcuni casi, come i carotaggi oceanici, la scala temporale è incerta, per cui si applica il metodo poco rigoroso dell'*orbital tuning*. Si esegue graficamente una correlazione tra l'andamento del *proxy* e la curva di variazione di un parametro astronomico come l'obliquità. Di conseguenza, dall'analisi della serie temporale si ottiene ovviamente un picco ben definito per il periodo di 41.000 anni; ma dall'analisi si rileva anche la presenza degli altri periodi astronomici, come quello della precessione climatica, e ciò rende credibili i risultati. L'uso di una datazione mediante radioisotopi, quando possibile, permette di superare i limiti del *tuning*. Per esempio, dagli *speleothem* (stalattiti, stalagmiti) si ottengono i valori di $\delta^{18}O$ relativi all'ossigeno del carbonato di calcio formatosi per deposito nelle caverne; questi valori, datati con i radioisotopi, mostrano una corrispondenza notevole con le curve di insolazione (Fig. 2). (Wang *et al.* 2008) Si noti la variazione negli ultimi 10.000 anni, con la diminuzione di insolazione; a essa ha corrisposto l'indebolimento del monzone asiatico e una progressiva aridità (Wang *et al.* 2005), cosa che avrebbe avuto un impatto non indifferente sulle civiltà (v. Sez. 5.2).

⁴ Si tratta di organismi unicellulari con guscio mineralizzato presenti nei fondali (bentonici).

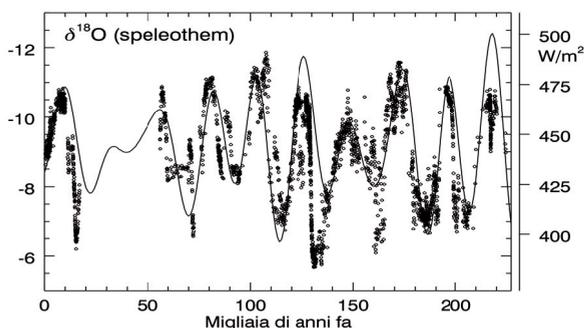


Fig. 2. Andamento di $\delta^{18}\text{O}$ relativo all'ossigeno del carbonato di calcio in stalagmiti in caverne in Cina (Wang *et al.* 2008); la curva continua è un esempio di insolazione (Berger 1978; latitudine: 65°N , epoca: metà luglio)

Un altro *proxy* significativo sono i pollini, perché registrano il cambiamento di vegetazione legato alle variazioni climatiche. Sul fondo di laghi vulcanici si depositano i pollini della vegetazione circostante, che possono conservarsi a lungo nelle stratificazioni; le loro diverse forme indicano le varie specie vegetali che li hanno prodotti. Per esempio, Allen *et al.* (1999) hanno effettuato carotaggi nel Lago Grande di Monticchio, sul vulcano spento del Vulture in Basilicata, e dall'analisi hanno dedotto l'andamento dei diversi tipi di vegetazione. Nel complesso, esso segue le variazioni di temperatura stimate in Antartide (o in Groenlandia). Negli ultimi 10.000 anni circa c'è stata localmente una preponderanza di boschi di latifoglie e di abeti, e poca presenza di erba; in precedenza, fino a 14.000 anni fa, era preponderante l'erba (graminacee selvatiche) e c'era una significativa presenza di pini e betulle (alberi di alta montagna). In altre parole, per molte decine di migliaia di anni si è avuto un ambiente stepposo tipico della tundra alpina o siberiana, invece dell'attuale bosco temperato.

5. Evoluzione della società umana

Anche se nella presente nota consideriamo soprattutto gli effetti sull'evoluzione della civiltà dell'*Homo sapiens*, ricordiamo dapprima gli studi recenti di paleoantropologia, che suggeriscono un effetto del clima sulla stessa evoluzione darwiniana degli 'ominini' in Africa negli ultimi milioni di anni. (deMenocal 2014; Potts 2013) Secondo questi studi, l'alternanza di climi umidi (ambiente con prevalenza di foreste) e secchi (prevalenza di savana), con periodo dato dalla precessione climatica, avrebbe avuto un effetto di tipo cumulativo sulle specie. L'evoluzione del genere *Homo* quindi non sarebbe consistita, come generalmente ritenuto fino a qualche tempo fa, in un singolo salto dall'ambiente della foresta a quello della savana, con conseguente sviluppo di bipedismo e intelligenza, ma sarebbe stata il risultato della risposta delle specie

all'alternanza di ambienti dovuta all'andamento a lungo periodo del clima. (deMenocal 2014)

5.1. Nascita dell'agricoltura

La nostra specie *Homo sapiens* si è formata in Africa orientale, circa 200.000 anni fa secondo l'analisi genetica (McDougall *et al.* 2005), ed è uscita dall'Africa varie volte, ma l'effettiva dispersione sarebbe avvenuta quasi 50.000 anni fa, più rapidamente in Asia meridionale e più lentamente in Europa. La genetica mostra che ci sono stati degli incroci con le popolazioni ivi presenti, come *Neandertals* e *Denisovans*. (Gibbons 2011) In Europa, i nostri antenati hanno vissuto di caccia, pesca, e raccolta, e hanno dimostrato una certa creatività nei grandi dipinti (come la grotta di Lascaux) e nelle sculture (come le cosiddette Veneri). Quindi avevano presumibilmente le nostre stesse capacità intellettive. Tutto ciò potrebbe suscitare meraviglia: è come se per decine di migliaia di anni i nostri antenati abbiano 'dormito', e si siano 'svegliati' di colpo poche migliaia di anni fa decidendo di creare le civiltà complesse. È il paradosso del *sapiens* discusso per esempio da Renfrew (2007). Una possibile spiegazione potrebbe essere proprio il clima, che nel Paleolitico fu freddo, secco e instabile, per niente adatto all'agricoltura.

Nel giro di poche migliaia di anni, il clima poi è cambiato completamente, diventando caldo e umido, e i nostri antenati sono stati costretti a sviluppare una diversa economia. A partire da circa 11.000 anni fa si nota, nei reperti archeologici, il passaggio graduale dalle specie selvatiche di cereali a quelle domestiche. Gli archeologi si sono comunque chiesti se proprio non ci sia stata agricoltura anche prima. Per esempio, sono stati trovati siti stanziali risalenti a più di 20.000 anni fa nel Levante (Ohalo II; Watkins 2010); però vi si viveva di caccia e raccolta, come facevano da sempre i cacciatori nomadi. Il passaggio deciso alla stanzialità si ha dopo la fine della glaciazione, nella Mezzaluna Fertile, un'area che va dall'Egitto al Golfo Persico. (Willcox 2013) Dopo il periodo pre-ceramico Natufiano e Khiamiano (circa 13.000 – 11.500 anni fa) coincidente con l'improvviso ritorno del freddo nell'epoca Younger Dryas (Balter 2010), nelle zone collinari intorno a Tigri ed Eufrate circa 11.500 – 10.500 anni fa abbiamo le prime indicazioni di attività agricole. (Willcox 2013) È l'epoca del cosiddetto *optimum* climatico caldo-umido, quando anche il Sahara e l'Arabia, per qualche migliaio di anni, non erano aridi come oggi, bensì verdi, ricchi di laghi e savane. (Cremaschi *et al.* 1998, Brooks 2006) Dopo questa fase, il progressivo cambiamento di insolazione avrebbe indotto il graduale inaridimento.

5.2 Civiltà complesse e loro crisi

In Mesopotamia si arriva alla formazione della cultura di Ubaid intorno a 7.500 anni fa, con presenza di villaggi sparsi dal Golfo Persico fino alla Siria; gli archeologi suggeriscono che si trattava di piccole unità indipendenti, ma con una forma culturale

comune. (Lawler 2012) Qualche millennio dopo, troviamo invece le grandi città (Uruk). Un elemento importante in questa evoluzione sociale sarebbe appunto l'andamento del clima, legato alla variazione di insolazione, e progressivamente sempre più arido. Data la diminuzione delle piogge, si è avuto un graduale trasferimento della popolazione in prossimità di fiumi e corsi d'acqua; in Mesopotamia si è dovuto far fronte alle difficoltà anche mediante l'irrigazione, costruendo canali artificiali.⁵ Come affermato da Brooks (2006, p. 44) in una *review* dettagliata:

While much work needs to be done on the links between environmental deterioration and the emergence of complex, organized, state-level societies, the case for climate change induced aridification as the principal driving force behind the development of the first 'civilizations' is strong.

Negli ultimi 10.000 anni ci sono state inoltre alcune fasi di clima ulteriormente secco o freddo, rilevate nell'Atlantico settentrionale, chiamate 'Bond events' (Bond *et al.* 1997), della durata di un paio di secoli e con periodicità media di circa 1.500 anni. Non c'è concordanza sulle possibili cause, ma a noi interessa far notare che anche in questo caso è stata proposta da alcuni un'azione cosmico-astronomica (attività solare, oppure effetti mareali lunari a lungo periodo (Wang *et al.* 2005; Keeling, Whorf 2000), pur se l'enfasi è stata comunque posta sulla dipendenza del clima dalla circolazione oceanica, da quella atmosferica e dalla relazione con i ghiacci nell'Atlantico Settentrionale. A questi eventi avrebbe corrisposto un blocco del sistema monsonico asiatico, con accentuata aridità, e conseguenti terribili ripercussioni sulle civiltà dell'epoca. Gli episodi più pesanti furono forse quelli di circa 8.000 e 4.000 anni fa. Qui ricordiamo il secondo: tra 4.200 e 4.000 anni fa si ebbe il crollo dell'impero di Akkad in Mesopotamia, il passaggio traumatico dall'Antico al Medio Regno in Egitto e il crollo della civiltà neolitica in Cina.⁶ (deMenocal 2001; Hassan 2007; Wang *et al.* 2005)

6. Conclusione

La teoria della dinamica del sistema solare e dei suoi effetti sull'orbita terrestre, e l'insolazione, sono ben definiti. Il grosso del lavoro teorico riguarda la modellistica del sistema climatico che risponde a queste sollecitazioni esterne (*orbital forcing*). Non ci sono risultati definitivi. Di definitivo, però, ci sarebbe l'importanza dell'*orbital forcing*. A quanto pare, non ci sono altre teorie plausibili oltre a quella orbitale, ed è questa mancanza di alternative a impressionare maggiormente. I lavori di paleoclimatologia, geologia, antropologia, preistoria e archeologia degli ultimi decenni tendono a formare un quadro progressivamente sempre più complesso ma allo stesso tempo internamente

⁵ Si può presumere che per costruire canali sia richiesto il lavoro coordinato di molte persone, e un'attività specializzata per realizzare l'attrezzatura adeguata, per cui sarebbero necessari gli agglomerati urbani.

⁶ Ci furono successivi problemi anche per la civiltà di Harappa in India. (Schug *et al.* 2013) In realtà, non sembra che l'aridità fosse stata globale, perché in alcune zone della Cina si ebbero molte piogge e inondazioni, che furono comunque devastanti per l'agricoltura (Wenxiang, Tungsheng 2004); non bisognerebbe quindi pensare ad aridità generale, piuttosto a degli eventi climatici estremi.

coerente, e ci suggeriscono che, per capire la storia dell'evoluzione della nostra specie e della civiltà umana (e soprattutto le sue prospettive future), non si può fare a meno dell'astronomia.

Bibliografia

- Allen J.R.M., Brandt U., Brauer A., Hubberten H.-W., Huntley B., Keller J., Kraml M., Mackensen A., Mingram J., Negendank J.F.W., Nowaczyk N.R., Oberhansli H., Watts W.A., Wulf S., Zolitschka B. (1999). "Rapid Environmental Changes in Southern Europe during the Last Glacial Period". *Nature*, 400, pp. 740-743.
- Balter M. (2010). "The tangled roots of agriculture". *Science*, 327, pp. 404-406.
- Berger A.L. (1976). "Obliquity and precession for the last 5000000 years". *Astronomy and Astrophysics*, 51, pp. 127-135.
- Berger A.L. (1978). "Long term variations of daily insolation and Quaternary climatic changes". *Journal of the Atmospheric Sciences*, 35, pp. 2362-2367.
- Berger A., Loutre M.F. (1994). *Precession, Eccentricity, Obliquity, Insolation and Paleoclimates*, in Duplessy J.C., Spyridakis M.T. (eds.), *Long-Term Climatic Variations; Data and Modelling*, NATO ASI Series, Serie I: Global Environmental Change, vol. 22. Berlin: Springer, pp. 107-151.
- Bond G., Showers W., Cheseby M., Lotti R., Almasi P., deMenocal P., Priore P., Cullen H., Hajadas I., Bonani G. (1997). "A pervasive millennial-scale cycle in North Atlantic Holocene and glacial climates". *Science*, 278, pp. 1257-1266.
- Brooks N. (2006). "Cultural responses to aridity in the Middle Holocene and increased social complexity". *Quaternary International*, 151, pp. 29-49.
- Butterfield N.J. (2011). "Terminal developments in Ediacaran embryology". *Science*, 334, pp. 1655-1656.
- Cremaschi M., di Lernia S. (1998). *The geoarchaeological survey in central Tadrart Acacus and surroundings (Lybian Sahara): environment and cultures*, in Cremaschi M., di Lernia S. (eds.), *Wadi Teshuinat: Palaeoenvironment and prehistory in south-western Fezzan (Lybian Sahara)*. Milano: Centro Interuniversitario di Ricerca per le Civiltà e l'Ambiente del Sahara Antico, pp. 234-296.
- deMenocal P.B. (2001). "Cultural Responses to Climate Change During the Late Holocene". *Science*, 292, pp. 667-673.
- deMenocal P.B. (2014). "Climate shocks". *Scientific American*, 2014, pp. 48-53.
- Emiliani C. (1955). "Pleistocene temperatures". *Journal of Geology*, 63, pp. 538-578.
- Gibbons A. (2011). "A new view of the birth of Homo sapiens". *Science*, 331, pp. 392-394.
- Hassan F.A. (2007). *Drought, famine and the collapse of the Old Kingdom: re-reading Ipuwer*, in *The Archaeology and Art of Ancient Egypt, Vol. I*. Le Caire: Conseil Suprême des Antiquités de l'Égypte, pp. 357-377.
- Hays J.D., Imbrie J., Shackleton N.J. (1976). "Variations in the Earth's orbit: pacemaker of the Ice Ages". *Science*, 194, pp. 1121-1132.

- Jouzel J., Masson-Delmotte V., Cattani O., Dreyfus G., Falourd S., *et al.* (2007). “Orbital and Millennial Antarctic Climate Variability over the Past 800,000 Years”. *Science*, 317, pp. 793-796.
- Kawamura K., Parrenin F., Lisiecki L., Uemura R., Vimeux F., *et al.* (2007). “Northern Hemisphere forcing of climatic cycles in Antarctica over the past 360,000 years”. *Nature*, 448, pp. 912-916.
- Keeling C.D., Whorf T. (2000). “The 1,800-year oceanic tidal cycle: A possible cause of rapid climate change”. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 97 (8), pp. 3814-3819.
- Laskar J., Fienga A., Gastineau M., Manche H. (2011). “La2010: a new orbital solution for the long-term motion of the Earth”. *Astronomy and Astrophysics*, 532 (A89), pp. 1-15.
- Lawler A. (2012). “Uncovering civilization’s roots”. *Science*, 335, pp. 790-793.
- Lisiecki L.E., Raymo M.E. (2005). “A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic $\delta^{18}\text{O}$ records”. *Paleoceanography*, 20 (PA1003), pp. 1-17.
- McDougall I., Brown F.H., Fleagle J.G. (2005). “Stratigraphic placement and age of modern humans from Kibish, Ethiopia”. *Nature*, 433, pp. 733-736.
- Potts R. (2013). “Hominin evolution in settings of strong environmental variability”. *Quaternary Science Reviews*, 73, pp. 1-13.
- Renfrew C. (2007). *Prehistory. The making of the human mind*, London. Phoenix: Orion Books Ltd.
- Schug G.R., Blevins K.E., Cox B., Gray K., Mushrif-Tripathy V. (2013). “Infection, disease, and biosocial processes at the end of the Indus Civilization”. *PLOS ONE* 8, e84814, pp. 1-20.
- Wang Y., H. Cheng, R.L. Edwards, Y. He, X. Kong, Z. An, J. Wu, M.J. Kelly, C.A. Dykoski, X. Li (2005). “The Holocene Asian Monsoon: links to Solar Changes and North Atlantic climate”. *Science*, 308, pp. 854-857.
- Wang Y., H. Cheng, R.L. Edwards, X. Kong, X. Shao, S. Chen, J. Wu, X. Jiang, X. Wang, Z. An (2008). “Millennial-and orbital-scale changes in the East Asian monsoon over the past 224,000 years”. *Nature*, 451, pp. 1090-1093.
- Wenxiang W., Tungsheng L. (2004). “Possible role of the ‘Holocene Event 3’ on the collapse of Neolithic Cultures around the Central Plain in China”. *Quaternary International*, 117, pp. 153-166.
- Watkins T. (2010). “New light on Neolithic revolution in south-west Asia”. *Antiquity*, 84, pp. 621-634.
- Willcox G. (2013). “The roots of cultivation in Southwestern Asia”. *Science*, 341, pp. 39-40.