

Dai sedimenti dei laghi ai transiti di Mercurio sul Sole: dati per una storia del clima tra preistoria e storia moderna

The transit of Mercury, lake sediments and paleoclimate

SIGISMONDI Costantino

RIASSUNTO - Il passaggio di Mercurio sul Sole del 2019 è stata occasione di raccogliere dati ad alta risoluzione per la misura della posizione del lembo solare, rispetto alle effemeridi del centro del Sole e di Mercurio che sono accurate quanto la precisione richiesta sul diametro solare, come indicatore dell'attività solare. La misura del diametro solare è prima inquadrata nel discorso interazione Sole-Terra e variazioni climatiche conseguenti, in cui abbiamo trattato anche il presente riscaldamento globale. La storia recente e passata del clima terrestre è passata in rassegna, indicando in particolare il ruolo dei sedimenti lacustri tra i vari indicatori.

PAROLE CHIAVE: astronomia, Sole, variazione di irradianza, clima, Terra.

ABSTRACT - The transit of Mercury over the Sun of November 11, 2019 has been an occasion to obtain high resolution images for measuring the position of the solar limb with respect to the ephemerides of the solar center and of Mercury, which are as accurate as we want to know about solar diameter variations, as proxy of the solar activity and its consequences on Earth's climate. This measurement is framed in the relations Earth-Sun and connected climate variations. The history of Earth's climate past and recent is draft along with present global warming, showing the role of lake sediments as proxies of past climate.

KEY WORDS: astronomy, Sun, irradiance variation, climate, Earth

1. - INTRODUZIONE

La coincidenza della data del convegno del 13 novembre 2019 con il raro transito del pianeta Mercurio sul Sole (evento che Keplero riuscì solo a prevedere, ma non ad osservare...) mi ha spinto a proporre questo tema di riflessione.

Anche dai sedimenti dei laghi si può ricostruire l'andamento regionale del clima in epoche durante le quali il contributo antropogenico al clima può essere considerato trascurabile o nullo; addirittura i periodi pre-glaciali sono caratterizzati da clima secco, drias, e rapido cambiamento su scale di decenni (SADORI, 2019).

Il ruolo del Sole riguardo al clima è di assoluta importanza, essendo l'input energetico antropogenico verso il pianeta Terra equivalente a quello ricevuto durante una sola delle 10000 ore annue di energia ricevuta dal Sole. La conoscenza della variabilità solare entro una parte su diecimila diventa perciò cruciale (perché tale variabilità può avere proprio l'entità di quanto produciamo noi...), e ci si può valere di dati da satellite, confrontabili tra loro nono-

stante la degradazione strumentale molto rapida (su tempi di 2-3 anni) soltanto negli ultimi 40 anni, il resto dell'andamento storico del comportamento del Sole è deducibile da "proxies" come gli anelli di accrescimento degli alberi, o le carote di ghiaccio, e - qui giunge il mio contributo specifico- anche le osservazioni astronomiche con e senza telescopio, di eclissi e transiti planetari.

La misura del diametro del Sole è uno di questi "proxies", dovutamente dibattuto nella comunità scientifica.

Uno dei metodi più interessanti è quello del cronometraccio dei transiti di Mercurio davanti al Sole, osservati a partire dal 1631, visibili poche volte per secolo.

Il prossimo transito sarà nel 2032, quindi l'occasione dell'11 Novembre 2019, con Mercurio al perielio (ed all'apogeo) è piuttosto rilevante.

Verrà discusso sia il metodo osservativo, sia le conoscenze attuali sulla variazione secolare del diametro solare, che prendono le mosse proprio da Roma, probabilmente a piazza del Collegio Romano, nel 1567, con l'osservazione che fece il Padre Clavio - noto alla sua epoca come "il secondo Euclide" - dell'ultima eclissi totale visibile dalla città Eterna...che lui vide annullare.

2. - LA GIORNATA DELLA METEOROLOGIA DEL 2019 ALLA SAPIENZA E IL PALEOCLIMA DAI FONDALI DEI LAGHI

In particolare il contributo di SADORI (2019) ha messo in evidenza il contributo dei sedimenti marini e di quelli lacustri all'andamento del clima. Per i laghi sono le alghe e i pollini che si sedimentano nel fondo del lago. Per l'oceano sono stati carotati 57 siti in tutto il mondo ottenendo una sequenza di oltre 5.2 milioni di anni. La sequenza più lunga d'Italia è stata completata alla fine degli anni '90 a Osteria dell'Osa presso Gabii sulla Prenestina: un antico lago vulcanico è stato drenato per essere coltivato. Si trova un'alternanza di evidenze di foreste e steppe: e la presenza di queste corrisponde alle fasi glaciali, mentre le foreste sono degli interglaciali. Le evidenze nei

fondali lacustri offrono risultati in accordo con quelli degli oceani. Il lago di Ocrida, il più vecchio d'Europa, conferma questi studi (SADORI, 2019b). Anche il lago di Mezzano ha mostrato la presenza di palafitte dell'età del bronzo a un livello che attualmente è 10 metri sotto il livello. Nella prima parte dell'età del bronzo è stato un luogo di insediamento, poi un luogo di culto, con i segnali dell'attività antropica mediante il fuoco, il taglio selettivo di querce e ontani e la coltivazione di graminacee.

Secondo la studiosa noi attualmente saremmo alla fine dell'interglaciale, e se non fosse per la presenza di gas serra come CO₂ e metano prodotti dall'attività umana.

Se non fosse per l'attività antropica la fine del periodo glaciale sarebbe rapidissima, poche decine di anni, preceduta da una fase secca, invece la transizione tra periodi freddi e interglaciali è meno rapida dell'ordine di centinaia di anni.

3. - IL BILANCIO ENERGETICO DEL SOLE RISPETTO ALLA TERRA

Se la Terra non avesse l'atmosfera la sua temperatura di equilibrio sarebbe negativa -15°C, e tutta l'acqua sarebbe ghiacciata. Proprio l'atmosfera con i suoi gas serra, il principale dei quali è H₂O, garantisce quell'effetto serra che tiene calda la superficie terrestre. Il contributo della vita nel corso degli ultimi 3 miliardi di anni di storia del pianeta è stato essenziale nella creazione dell'ossigeno in atmosfera, e ha interagito con le varie fasi climatiche che la Terra ha subito, passando per alcune fasi glaciali, anche molto lunghe in cui tutto il pianeta era ghiacciato (e.g. Glaciazione Huroniana, tra 2.4 e 2.1 miliardi di anni fa) e i periodi di Snowball Earth tra 700 e 500 milioni di anni fa.

In questa fase il Sole aumentava gradualmente la sua energia determinando il così detto Faint Young Sun Paradox. Quando la vita è nata sulla Terra il Sole era il 30% più debole di oggi, e tra 600 milioni di anni invece, il Sole sarà più forte di oggi mettendo fine alle condizioni della vita come la conosciamo oggi.

Il Sole oggi manda sulla Terra una quantità di energia che è pari a 10000 volte quella prodotta dall'uomo. Fino a qualche secolo fa, però, questo contributo antropico era quasi nullo, e non perturbava il clima sulla Terra, cosa che invece la vita in generale aveva sicuramente fatto sia a livello chimico che a livello di albedo.

Inizialmente si parlò di costante solare, circa 1366 W/m², ma gli studi più recenti mostrano una certa variabilità di irradianza legata alla presenza o meno delle macchie sulla superficie del Sole.

Non è detto che l'irradianza nel visibile sia l'unica variabile responsabile dei cambiamenti climatici sulla Terra, rispetto a quella nell'ultravioletto (che interagisce proprio con l'Ozono). Di fatto la nostra stella è variabile, e pertanto anche le condizioni sulla Terra sono naturalmente sottoposte a un forzante variabile.

Il sistema Terra cerca, poi, il suo equilibrio.

Nella teoria dell'origine astronomica delle glaciazioni di Milankovitch si attribuisce alle variazioni dei parametri orbitali terrestri la causa dell'allontanamento periodico dal Sole per le perturbazioni operate dagli altri pianeti. Eccentricità, semiasse maggiore e inclinazione dell'asse terrestre variano nel tempo e innescano cambiamenti climatici.

Negli ultimi cento milioni di anni la forma della Terra è cambiata relativamente poco rispetto a ciò che è avvenuto fino a trecento milioni di anni quando si formò la Pangea. Prima ancora, attraverso lo studio del paleomagnetismo, si sono ricostruiti degli scenari tanto esotici quanto incerti, con i supercontinenti Columbia oltre un miliardo di anni fa e Rodinia 0.7 miliardi di anni fa, che poi si frammentano. La posizione delle masse continentali rispetto all'equatore o ai poli offre la possibilità di facilitare l'innescare di un'era glaciale quando i continenti sono più vicini ai poli.

4. - LA PICCOLA ERA GLACIALE (1645-1715)

Durante questo periodo in Europa gli inverni sono stati più rigidi, i raccolti meno abbondanti, l'economia più rallentata e la vita più dura (LE ROY

LADURIE, 1967).

E' accertato che questo ha coinciso con un'attività solare ridotta o nulla chiamato minimo di Maunder (USOSKIN, 2017). Oltre a questo periodo si sono verificati altri minimi solari coincidenti con inverni rigidi, compreso l'anno senza estate che ha seguito il minimo solare di Dalton 1810-14.

Nell'anno senza estate ci furono dei contributi vulcanici all'andamento climatico mondiale.

Sembra che la piccola era glaciale sia stato un fenomeno "locale", che abbia cioè riguardato solo l'Europa (BARBUZANO 2019, NEUKOM *et alii* 2019).

5. - LA SITUAZIONE ORBITALE ATTUALE DELLA TERRA

I cicli orbitali della Terra comprendono l'avvicinamento del perielio con l'afelio in circa 117000 anni e l'oscillazione dell'obliquità dell'asse terrestre di 41000 anni, mentre l'eccentricità ha una periodicità di 92000 anni. La precessione dell'asse terrestre si compie in 26000 anni mentre quella degli equinozi in 21000. Attualmente il perielio cade attorno al 6 gennaio e l'afelio attorno al 6 luglio. Per l'emisfero boreale, dove c'è più terra che oceano, l'inverno è più mite perché il Sole è a 147 milioni di km, mentre nella nostra estate il Sole è a 152 milioni di km. Con la situazione invertita abbiamo una condizione più favorevole ad una glaciazione che coinvolga l'emisfero Nord.

L'obliquità attuale è 23°26' e si sta gradualmente riducendo. Si trova grossomodo a metà dell'oscillazione. Obliquità minori significano stagioni meno marcate, mentre obliquità maggiori implicano inverni più freddi e estati più calde, nelle quali però il ghiaccio accumulatosi d'inverno non si fonde. Anche questa è una condizione favorevole alla glaciazione.

L'eccentricità maggiore significa maggiore disparità tra perielio e afelio: attualmente rispetto ad una distanza media dal Sole di 149.6 milioni di km c'è una forbice di quasi 3 milioni di km in meno e in più per i valori estremi. Nei casi più estremi la forbice si apre a 8 milioni di km e anche questo favorisce la glaciazione.

Di tutti questi cicli millenari attualmente ci troviamo lontano dai valori estremi, per cui non troverei ragioni imminenti per l'onset di un periodo glaciale da forzanti astronomici, ma su scale temporali di alcuni secoli, tra 50 e 100, le condizioni si ri-proporranno.

Infatti la precessione si combina con la rotazione degli apsidi: il perielio attuale (Fig. 1 in alto) non è esattamente coincidente con il solstizio invernale, mentre lo era quasi al tempo di Tolomeo, cadendo il 24 dicembre. Dal tempo di Tolomeo sono passati circa 2000 anni e il solstizio si è spostato di quasi 15

giorni in avanti. 180 giorni si completano in circa 12000 anni e cioè tra 10000 anni avremo il perielio in estate, che sarà quindi breve e rovente, e l'afelio in inverno, lungo e gelido. Si vede che già tra 5000 anni l'estate si accorcerà e l'inverno si allungherà, determinando astronomicamente situazioni più favorevoli alle glaciazioni. Ho trascurato l'eccentricità e l'obliquità che pure danno il loro contributo, come insegna Milankovitch.

L'attività solare invece può essere già favorevole ad un periodo freddo, essendo gli attuali cicli solari molto bassi rispetto ai massimi della fine degli anni

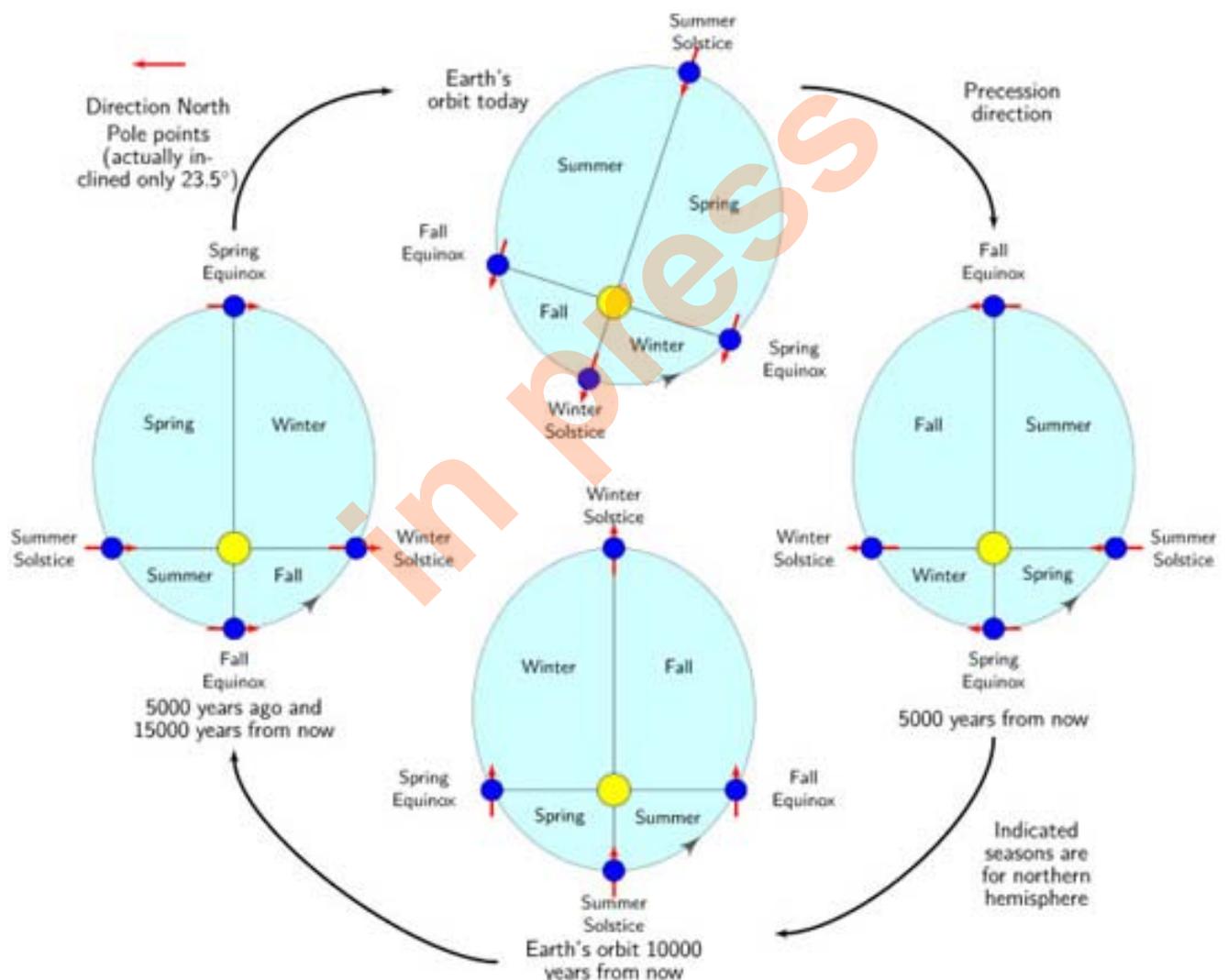


Fig. 1 - (da Wikipedia, https://en.wikipedia.org/wiki/File:Precession_and_seasons.svg)

Effetti della precessione degli apsidi sulle stagioni con l'eccentricità aumentata per meglio percepire il fenomeno. Le stagioni mostrate sono quelle per l'emisfero Nord (sono sempre al contrario per il Sud). Alcuni effetti climatici seguono principalmente perché al Sud prevalgono gli oceani.

- (da Wikipedia, https://en.wikipedia.org/wiki/File:Precession_and_seasons.svg)

Effects of the precession of the apsidi on the seasons with the increased eccentricity to better perceive the phenomenon. The seasons shown are those for the Northern hemisphere (they are always the opposite for the South). Some climatic effects follow mainly because the oceans prevail in the South.

'40 del novecento e adesso –all'inizio del ciclo XXV– l'attività è nulla da diversi mesi, in modo affatto differente da quanto accadde al principio del minimo scoperto nel 1893 da Walter Maunder a Greenwich mentre esaminava i dati dell'attività solare del passato.

6. - TRANSITI DI MERCURIO E DIAMETRO SOLARE

Lasciando al buon senso se l'attuale cambiamento climatico sia più un'opportunità da sfruttare che una iattura da demonizzare per l'umanità, ora mi concentro sui *proxies*, gli indicatori dell'attività solare.

Oltre al Berillio 10 contenuto in frazioni infinite nell'atmosfera, ci sono le tracce lasciate negli anelli di accrescimento degli alberi (dendrocronologia) e le componenti di Ossigeno-18 isotopo più pesante rispetto al 16 dalle quali si può risalire all'attività solare nel passato.

Alla fine degli anni '70 del novecento venne alla ribalta un tema, quello della variabilità solare, a partire da uno studio di Jack Eddy che riguardava i cicli secolari che modulavano l'attività solare.

Per fare un esempio più contemporaneo citerò il caso di Betelgeuse, la supergigante rossa di Orione, che ha due cicli principali di variabilità 1.2 e 5.9 anni: il secondo modula le oscillazioni del primo ciclo dando luogo ad un'alternanza più lenta di minimi deboli e massimi più brillanti. Esistono anche altre componenti armoniche che sono su scale temporali diverse e più lunghe, ed ora nel 2020 ci ritroviamo con un minimo che da più di un secolo a questa parte non è mai stato osservato, ma sicuramente in un passato estremamente lontano è stato visto da qualcuno... Lo stesso accade per il Sole, per il quale le modulazioni delle oscillazioni esistono su periodi di 88 anni (Gleissberg) 208 anni (Suess) e 900-1000 anni (Eddy) (SUMMERHAYES, 2008).

Nel coté culturale di queste ricerche, parallelamente allo studio delle eclissi di Sole documentate, nel 1984 è stato intrapreso il progetto SDS Solar Disk Sextant della Yale University con la NASA, guidato dal prof. Sabatino Sofia. Dal 2000 ho parteci-

pato anche io al progetto, da visiting scholar a Yale. In questo progetto si volevano misurare variazioni assolute del diametro solare, poiché la prima prova che Eddy portò era una variazione di 4" del diametro solare per tener conto dell'osservazione di Clavio del 1567 a Roma di un'eclissi anulare il 9 maggio. Le effemeridi moderne prevedono un'eclissi annular-total per quel giorno e quel sito, quindi per essere stata anulare il Sole doveva essere angolarmente più grande. Nel 1979 Sofia ed altri misurarono il diametro del Sole nell'eclissi totale americana, confrontandolo con il 1925 (totale su Manhattan) e col 1715 totale sull'Inghilterra e osservata da Halley trovando variazioni. Nel 1980 Irwin I. Shapiro rianalizzò i dati dei transiti di Mercurio dal seicento non trovando conferme di variazioni significative del diametro solare. Nel 2002 Sveshnikov rianalizzò i dati di Shapiro ridiscutendoli, confermando in buona sostanza i risultati di Shapiro. Nel 2012 dopo il secondo transito di Venere Marcelo Emilio dimostrò che dal 2003 il Sole non aveva avuto sostanziali cambiamenti di diametro entro 15 km, stando ai dati dei transiti di Mercurio osservati con il satellite SOHO e dei transiti di Venere, con SDO.

SOHO è un ottimo satellite NASA/ESA che funziona dal 1995, ma il telescopio e il sistema di imaging non è certo capace di una risoluzione di 15 km, laddove 700 km corrispondono ad 1". Servirebbe un'apertura di 4.7 metri per avere un limite di diffrazione così basso, per altro difficilmente realizzabile per uno strumento dedicato al Sole. Attualmente il maggiore telescopio al mondo è l'Inouye Solar Telescope inaugurato a fine gennaio 2020 con uno specchio primario di 4 metri.

La combinazione di apertura di obiettivo e timing accurato può portare a superare il limite di diffrazione di uno strumento. Questa strategia è sostanzialmente alla base di tutti i tentativi fatti con il Sole negli ultimi anni. L'uso del transito di Mercurio sul Sole come metodo di misurazione del diametro diventa, con l'aumentare dell'affidabilità delle effemeridi e del Sole e di Mercurio, una misurazione della posizione del lembo del Sole tracciato dalla posizione di Mercurio, rispetto ad un centro del Sole che si suppone noto. Anche il centro di Mercurio si

suppone noto dalle effemeridi, così che l'unico parametro variabile diventa la posizione del lembo solare, assunto perfettamente sferico, e lo è entro 10 millisecondi d'arco su 1920 secondi d'arco complessivi, che è il valore accettato per lo schiacciamento polare del Sole dalle misure del satellite RHESSI nella review di DAMIANI *et alii* (2011).

La fase d'ingresso del transito di Mercurio di Novembre (2019, e il prossimo del 2032) dura circa 2 minuti perché il pianeta è più vicino alla Terra (al suo perielio), mentre a Maggio (2016) dura circa 3 minuti col pianeta all'afelio. Mercurio ha un diametro di 12" a Maggio e 10" a Novembre, per cui la sua velocità angolare è di 83 millisecondi d'arco al secondo a Novembre e 60 a Maggio. Un timing accurato che permetta di definire i tempi di contatto al decimo di secondo consente una misura del diametro solare a 8 mas di precisione, cioè 3 km, migliore di quella raggiunta dalle misure di SOHO.

Abbiamo ottenuto i dati dal telescopio del Big Bear Observatory che è il maggiore negli Stati Uniti continentali, e sono attualmente in analisi dal mio gruppo di Fisica Solare "Alessandro Cacciani" presso la Sapienza Università di Roma che quest'anno accademico 2019-2020 è composto da Claudia Caldarella e Elisa Cicillini.

BIBLIOGRAFIA

- SADORI L. (2019) - *Giornata Mondiale del Clima 2019*, 23 marzo, Aula Magna Sapienza,
- https://www.youtube.com/watch?v=d3l94XfdQj8&fbclid=IwAR2PZC-x-IKcaefkYk0Sm6CNWHRJbycsza32GtpW07_G5Sv3gxZsPEr9rmg dal minuto 40 fino a 1h 17 min (accesso 21/02/2020).
- SADORI L. (2019b) - <https://www.uniroma1.it/it/notizia/regione-mediterranea-rischio-di-inaridimento-la-spiegazione-arriva-dal-passato-e-riguarda-il>.
- https://en.wikipedia.org/wiki/Faint_young_Sun_paradox (accesso 22/02/2020).
- <https://www.youtube.com/watch?v=Q1OreyX0-fw&list=FLS306MSK8OCNVGAWolRT18Q> (accesso 22/02/2020).
- LE ROY LADURIE E. (1967) - *Histoire du climat depuis l'an mil*, Paris: Flammarion.
- USOSKIN I. (2017) - *A history of solar activity over millennia*, Living Review of Solar Physics 14.
- https://it.wikipedia.org/wiki/Anno_senza_estate (accesso 22/02/2020).
- https://it.wikipedia.org/wiki/Moti_millenari (accesso 22/02/2020).
- https://en.wikipedia.org/wiki/Milankovitch_cycles (accesso 22/02/2020).
- BARBUZANO J. (2019) - *The Little Ice Age wasn't global, but current climate change is*, *Eos*, 100, <https://eos.org/articles/the-little-ice-age-wasnt-global-but-current-climate-change-is> (accesso 22/02/2020).
- NEUKOM R. & ALI (2019) - *No evidence for globally coherent warm and cold periods over the preindustrial Common Era*, *Nature* 571, 550.
- SUMMERHAYES C.P. (2015) - *Earth's Climate Evolution*, Wiley Blackwell .
- <https://www.media.inaf.it/2020/01/29/prima-luce-dkist/> (accesso 22/02/2020).
- DAMIANI C., ROZELOT J-P., LEFEBVRE S., KILCIK A. & KOSOVICHEV A.G. (2011) - *A brief history of the solar oblateness*. A review. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, Elsevier, 2011, **73** (2-3), 241-250.