A02

Elio Antonello

Astronomia, paleoclimatologia evoluzione umana e delle società umane

Aracne editrice

www.aracneeditrice.it
info@aracneeditrice.it

Copyright © MMXX
Gioacchino Onorati editore S.r.l. – unipersonale

www.gioacchinoonoratieditore.it
info@gioacchinoonoratieditore.it

via Vittorio Veneto, 20
00020 Canterano (RM)
(06) 45551463

ISBN 978-88-255-3410-8

I diritti di traduzione, di memorizzazione elettronica, di riproduzione e di adattamento anche parziale, con qualsiasi mezzo, sono riservati per tutti i Paesi.

Non sono assolutamente consentite le fotocopie senza il permesso scritto dell'Editore.

I edizione: luglio 2020

Indice

7 *Prefazione*

9 Capitolo I
Quadro generale

1.1. Introduzione, 9 – 1.2. La Terra: biosfera e dinamica orbitale, 11 – 1.2.1. *Biosfera*, 12 – 1.2.2. *La dinamica*, 14 – 1.3. Insolazione, 15 – 1.4. Proxy, 20 – 1.5. Paleoclima, 23 – 1.5.1. *Indicazioni da Antartide e da oceani*, 23 – 1.5.2. *Gas serra: CO_2, CH_4, N_2O*, 29 – 1.5.3. *Livello del mare*, 31 – 1.5.4. *Polvere*, 31 – 1.5.5. *Altri gas*, 32 – 1.5.6. *Speleotemi e monsoni*, 34 – 1.5.7. *Pollini*, 36 – 1.5.8. *Prossima glaciazione?*, 37 – 1.5.9. *Conclusione*, 39 – 1.6. Evoluzione dell'uomo e della società umana, 39 – 1.6.1. *Homo sapiens*, 39 – 1.6.2. *L'Olocene*, 43 – 1.7. Conclusione del Capitolo I, 49.

51 Capitolo II
Geologia, stratigrafia e astronomia

2.1. Introduzione, 51 – 2.2. Geologia e clima, 51 – 2.2.1. *Tettonica*, 51 – 2.2.2. *Periodi glaciali e periodi caldi*, 53 – 2.3. Ciclostratigrafia orbitale, 57 – 2.4. Parametri orbitali e stratigrafia, 60 – 2.5. Proxy e geochimica organica, 69 – 2.5.1. *Marcatori biologici*, 70 – 2.5.2. *Fotosintesi*, 71 – 2.5.3. *Proxy di origine animale*, 73 – 2.5.4. *Pollini*, 73 – 2.6. Paleoclima del Cenozoico, 74 – 2.6.1. *Eventi ipertermici tra Paleocene ed Eocene: il PETM*, 75 – 2.6.2. *Dall'Eocene all'ultimo Miocene*, 80 – 2.7. Conclusione del Capitolo II, 86.

89 Capitolo III
Paleoclima e comparsa del genere Homo

3.1. Introduzione, 89 – 3.2. Il clima dall'ultimo Miocene al Pleistocene, 91 – 3.2.1. *Andamento del clima tra circa 7 e 3 milioni di anni fa*, 91 – 3.2.2. *Il clima dopo 3 milioni di anni fa*, 93 – 3.2.3. *Nota sulla nomenclatura*, 96 – 3.2.4. *Il clima nella fascia monsonica*, 97 – 3.3. Paleoclima ed ipotesi paleoantropologiche, 104 – 3.3.1. *Ominini e Africa orientale*, 104 – 3.3.2. *Teorie evolutive e clima*, 107 – 3.4. Indicazioni dalla flora e dalla fauna africa-

ne, 111 – 3.5. Evoluzione degli ominini, 113 – 3.6. Il genere *Homo*, 115 – 3.7. Conclusione, 119.

121 Capitolo IV
Homo sapiens e civiltà umana

4.1. Il clima dal Paleolitico all'età moderna, 121 – 4.1.1. *Circolazione atmosferica e circolazione oceanica*, 122 – 4.1.2. *Eventi Dansgaard–Oeschger, Heinrich, e il clima della fase glaciale*, 124 – 4.1.3. *Ultimo massimo glaciale*, 132 – 4.1.4. *Younger Dryas*, 134 – 4.1.5. *Cambiamenti climatici rapidi nell'Olocene*, 137 – 4.1.6. *Ipotesi sull'origine dei cambiamenti rapidi*, 141 – 4.1.7. *ENSO*, 151 – 4.2. Paleolitico e *Homo sapiens*, 152 – 4.2.1. *Genetica e migrazioni*, 152 – 4.2.2. *Sviluppo del cervello ed espressioni culturali*, 156 – 4.3. Dal Paleolitico alla nascita dell'agricoltura, 158 – 4.3.1. *La cultura natufiana pre–agricola e la Younger Dryas*, 159 – 4.3.2. *Optimum climatico e nascita dell'agricoltura*, 160 – 4.4. Eventi climatici, archeologia e storia, 164 – 4.4.1. *11400 anni fa*, 164 – 4.4.2. *10300 anni fa*, 165 – 4.4.3. *9300 anni fa*, 166 – 4.4.4. *8200 anni fa*, 168 – 4.4.5. *7400 anni fa*, 173 – 4.4.6. *5900 anni fa*, 174 – 4.4.7. *4200 anni fa*, 176 – 4.4.8. *3200 anni fa*, 183 – 4.5. Ultimi millenni, 187 – 4.5.1. *Piccola era glaciale della tarda antichità*, 189 – 4.5.2. *Piccola era glaciale*, 191 – 4.6. Considerazioni finali sul clima nel Mediterraneo, 194.

199 Capitolo V
Situazione attuale e futuro

5.1. Introduzione, 199 – 5.2. Riscaldamento globale e psicologia, 202 – 5.3. Necessità delle ricerche, 204 – 5.4. Impatto sociale e urgenze, 208.

213 *Conclusione*

215 *Bibliografia*

Prefazione

Gli studi di paleoclimatologia mostrano il legame del clima con i parametri orbitali della Terra e possibilmente con l'attività solare. Inoltre, l'andamento a lungo periodo del clima, attraverso i suoi effetti sull'ambiente, appare aver condizionato, e presumibilmente continuerà a condizionare l'evoluzione stessa dell'uomo e della civiltà umana. In altre parole, per comprendere la storia dell'umanità non si può prescindere dall'astronomia. A questa conclusione non trascurabile si arriva mettendo insieme i risultati ottenuti nelle varie discipline scientifiche e umanistiche, come astronomia, geoscienze, climatologia, antropologia, preistoria, protostoria e storia.

Gli argomenti discussi sono stati trattati precedentemente dall'autore in seminari, conferenze e presentazioni a convegni. Il materiale qui usato è stato ricavato soprattutto da articoli pubblicati (fino a ottobre 2019) nelle principali riviste scientifiche di tipo generale e in alcune di quelle specialistiche.

Il presente testo, piuttosto succinto rispetto all'ampiezza dell'argomento, è inteso essenzialmente come uno strumento di lavoro, e ovviamente è emendabile[1].

1. Per eventuali segnalazioni: elio.antonello@inaf.it. Per il contesto di questa attività, si può consultare il sito: www.brera.inaf.it/utenti/antonello/.

Capitolo I

Quadro generale

1.1. Introduzione

Talvolta, la società civile si pone qualche domanda sull'effettiva importanza della cultura, riconoscendone la necessità, ma chiedendosi se essa sia proprio indispensabile. È un dubbio che, nelle ricorrenti crisi economiche, accompagnate da scarsità di risorse, è stato manifestato anche mediante la frase colorita: "Con la cultura non si mangia", dove il termine "cultura" comprende le espressioni dell'intelletto e dell'immaginazione umana, cioè le arti, le lettere e le scienze. Il dubbio non è stato avanzato solo in Italia, ma, con qualche insistenza, in tutto il mondo occidentale. Lo dimostrano gli editoriali e gli articoli di commento che appaiono spesso su riviste quali « Nature » e « Science » e dedicati alla necessità della divulgazione dei risultati scientifici, con la finalità di informare la società civile e soprattutto convincerla dell'indispensabilità della ricerca (e quindi di agevolarne il finanziamento). Per questo scopo è necessario anche superare l'inevitabile disorientamento creato dall'altrettanto inevitabile disparità delle opinioni scientifiche, o ipotesi interpretative diverse, in particolare quando queste hanno un impatto politico: un caso emblematico è il problema del clima e del riscaldamento globale[1].

In questo contesto, ci siamo allora chiesti: l'astronomia ha un'importanza fondamentale per la vita della società civile oppure no? Gli studi dei fenomeni astronomici e astrofisici sono realmente indispensabili? Da un lato, il loro impatto sulla conoscenza umana è ovvio, ma si tratta di una soddisfazione intellettuale; dall'altro lato, non è suffi-

1. Gli esempi sono moltissimi, e ne ricordiamo qualcuno. Per la scienza in generale: Arimoto e Sato (2012), Sarewitz (2014), Leshner (2015), Malakoff (2017). Per il clima in particolare: Tollefson (2010), la breve rassegna riportata nel Capitolo V, e il numero recente di « Nature » del 19 settembre 2019.

ciente portare come giustificazione le lodevoli ricadute tecnologiche di interesse più generale, derivate dal progresso nelle tecniche astrofisiche. Secondo chi scrive, l'importanza sta nel fatto che l'andamento del clima, con i conseguenti effetti sull'ambiente, è regolato anche da parametri astronomici. In qualche modo, la stessa evoluzione umana e lo sviluppo delle sue civiltà sono dipese dalle condizioni ambientali, e quindi da tale andamento. E così come ha influito in passato sulla vita dei nostri antenati, il clima influirà in futuro su quella dei nostri discendenti. In altre parole, per capire il perché di come siamo, e per prevedere cosa potrebbe prospettare il futuro per la vita umana, è indispensabile anche l'astronomia[2].

Ci si è resi effettivamente conto degli inesorabili effetti astronomici sul clima a partire dagli anni Cinquanta del secolo scorso, analizzando i carotaggi dei fondali oceanici, e poi delle calotte di ghiaccio, dei fondi dei laghi, ecc., cioè i risultati delle trivellazioni effettuate per scopi scientifici. Ed è dagli anni Settanta che questa conoscenza ha iniziato a diffondersi e interessare le altre discipline. Abbiamo cercato allora di confrontare quanto viene detto da coloro che si occupano di astronomia, paleoclimatologia e geoscienze, paleoantropologia, preistoria e storia (e le scienze collegate come archeobotanica e archeozoologia), per mostrare come i risultati degli studi di tali discipline siano tra loro connessi, e per concludere che, al fine di capire le prospettive future della società umana, è indispensabile averli tutti presenti e corroborarli con sempre nuove ricerche.

La necessità della rassegna qui presentata è nata nel contesto dell'astronomia culturale (Antonello 2013a), riflettendo sull'importanza dell'astronomia per poter comprendere la storia umana. Non avendo la pretesa di coprire tutti gli argomenti, in particolare di preistoria e storia, ci occuperemo di quanto avvenuto soprattutto in Africa ed Eurasia, riportando dei casi esemplificativi per quanto riguarda la nostra problematica. Per questo motivo, parlando delle civiltà antiche, ricorderemo in particolare quelle dell'Eurasia, e non tratteremo delle civiltà precolombiane in America.

In questo *Capitolo I* illustreremo gli aspetti generali, trattando brevemente la dinamica della Terra e gli effetti sul clima dedotti dall'analisi

2. Notiamo incidentalmente che per i nostri antenati l'astronomia intesa come osservazione del cielo (calendario) è stata un'attività necessaria per sviluppare l'agricoltura; in altre parole, è stato anche grazie alla "cultura" astronomica se essi hanno potuto "mangiare".

di diversi *proxy*, e, per sommi capi e con qualche esempio, la preistoria umana dal Paleolitico fino agli ultimi millenni nel contesto climatico. Nel *Capitolo II*, dopo aver ricordato i proficui legami tra scienze geologiche e astronomia, vedremo in particolare il clima nell'era del Cenozoico, dal Paleocene, 66 Ma (*milioni di anni*) fa, all'ultimo Miocene, circa 7 Ma fa. Nel *Capitolo III* ci occuperemo degli effetti astronomici sul clima e l'ambiente e di conseguenza anche sull'evoluzione degli *Hominini* e del genere *Homo*; ci riferiremo quindi al Miocene finale, Pliocene, e il Pleistocene da 2,6 Ma fa fino alla comparsa dell'*Homo sapiens* circa 300 ka (*mila anni*) fa. Nel *Capitolo IV* parleremo degli effetti climatici sull'evoluzione successiva dell'*Homo sapiens* nel Pleistocene finale e, con qualche dettaglio, delle sue società durante l'Olocene[3] fino ad arrivare agli ultimi secoli. Infine, nel *Capitolo V* riporteremo le problematiche attuali, legate anche all'effetto antropico sull'ambiente, e le prospettive future.

1.2. La Terra: biosfera e dinamica orbitale

La storia della Terra è iniziata circa 4 miliardi e mezzo di anni fa con la formazione del Sistema Solare. Per buona parte di questo tempo l'evoluzione biologica sembrerebbe essere stata piuttosto lenta. La vita unicellulare sembra sia iniziata nel mare dopo circa 700–800 milioni di anni (Nutman *et al.* 2016; Dodd *et al.* 2017)[4]. Nel mare si sarebbero evoluti anche i primi organismi multicellulari, circa tre miliardi di anni dopo la formazione della Terra (Zhu *et al.* 2016), ed è sorprendente che la vita degli organismi molto complessi sia iniziata, in un certo senso di colpo, solo ca. 635 Ma fa (Ediacarano), e infine ca. 541 Ma fa nel Fanerozoico[5]. Successivamente, un po' alla volta sono state

3. Walker *et al.* (2009), sulla base dei dati NGRIP (2004), definiscono l'inizio dell'Olocene, cioè identificano la transizione Pleistocene–Olocene, 11700 anni prima dell'anno 2000.

4. Si ritiene comunque che qualche forma di vita microbica si sia sviluppata un po' in parallelo a quella marina anche in ambienti umidi sulla terraferma, lungo le coste e in zone lacustri (Beraldi–Campesi 2013). Per il punto della situazione sui microfossili, possono essere utili i lavori di Brasier *et al.* (2015) e di Javaux (2019).

5. Butterfield (2011) affermava che fin dai tempi di Darwin c'era stato un vuoto sconcertante, sia paleontologico sia "psicologico", alla base dell'eone Fanerozoico; perché se la teoria dell'evoluzione graduale fosse vera, allora gli oceani del pre–Fanerozoico

colonizzate le terre emerse. Le ultime centinaia di milioni di anni sono state caratterizzate da una serie di grandi estinzioni di massa, legate forse a disastrosi cambiamenti paleoambientali, per i quali non sono da escludere anche cause astronomiche o cosmiche, come per esempio il noto caso della scomparsa dei dinosauri (circa 66 milioni di anni fa) legata forse agli effetti climatici e ambientali prodotti dalla caduta di un grande asteroide.

1.2.1. *Biosfera*

Per comprendere la storia di quanto avvenuto nella biosfera (che coinvolge atmosfera, idrosfera, criosfera, litosfera), bisogna tenere presente, come in tutti i sistemi fisici, le relative condizioni al contorno che l'hanno determinata o condizionata. Nel caso della biosfera abbiamo da una parte il cosmo con la radiazione solare, i corpi del sistema solare, la Galassia, e dall'altra parte l'interno della Terra con la tettonica e l'attività vulcanica. Si tratta di condizioni caratterizzate da tempi scala anche molto diversi, e spesso con andamento ciclico, dai milioni di anni fino all'alternarsi quotidiano di giorno e notte. La stessa evoluzione e sviluppo degli esseri viventi ne sono stati, e ne sono, influenzati, in quanto gli organismi hanno risposto, e rispondono (come specie e come individui), a tali sollecitazioni (*biotic response;* Rodrìguez–Tovar 2014).

La radiazione solare varia a seguito dei processi legati alla struttura ed evoluzione del Sole, con tempi scala quindi che possono essere molto lunghi, centinaia di milioni di anni e più (Beer *et al.* 2000); ma ci sono anche fenomeni a periodo breve, come il noto ciclo delle macchie solari di 11 anni, o 22 anni per il campo magnetico (Hathaway 2015). La radiazione ricevuta dalla Terra dipende poi dalla sua distanza dal Sole, che varia (anche se di poco) data la sua orbita leggermente ellittica, come discuteremo nelle prossime Sezioni.

L'esistenza di una eventuale periodicità delle estinzioni di massa, dell'ordine di decine di milioni di anni, è stata ed è oggetto di studi

sicuramente dovrebbero essere stati brulicanti di animali, nonostante questi siano invece assenti nei fossili trovati finora. Zhu *et al.* (2016) hanno mostrato che organismi eucarioti macroscopici erano però effettivamente presenti ca. 1600 Ma fa; secondo gli autori, la rarità di fossili dovrebbe essere dovuta ai processi di conservazione e non a una semplice assenza biologica.

e discussioni. Si è supposta anche una sua dipendenza da fenomeni cosmici, legati alle interazioni nell'ambiente in cui il Sistema Solare viene a trovarsi nella sua orbita nella Galassia. Per esempio, si è parlato di effetti di *bursts* di raggi cosmici o di raggi gamma, di esplosioni di supernovae, di perturbazioni delle orbite dei numerosissimi corpi minori del Sistema Solare esterno (asteroidi, comete nella Nube di Oort) che si spostano verso il Sistema Solare interno, e di attraversamenti di nubi interstellari[6].

Gli spostamenti orizzontali e verticali della crosta terrestre associati alla tettonica a placche hanno un ruolo fondamentale nei cambiamenti climatici su un ampio *range* di tempi (DeConto 2009). La posizione di continenti e oceani cambia con tempi scala dell'ordine dei milioni di anni, e di conseguenza cambiano le condizioni termiche, quelle dell'albedo delle superfici (incluse le calotte di ghiaccio). Ci sono l'apertura e la chiusura di passaggi marini tra i continenti, da cui derivano modifiche della circolazione oceanica. Inoltre c'è il sollevamento di montagne e abbassamento di suoli che modificano la circolazione atmosferica.

Singole eruzioni vulcaniche, con le loro emissioni di gas, aerosols e polveri che si diffondono nella stratosfera, possono avere effetti immediati sul clima, e con durata più o meno lunga (tempo scala di anni) a seconda dell'intensità dell'eruzione. Invece l'attività vulcanica generale negli archi continentali, cioè le zone di subduzione attive dei margini continentali, può avere un effetto determinante sul clima con tempi scala di decine e centinaia di milioni di anni (McKenzie *et al.* 2016; Macdonald *et al.* 2019). Enormi fuoriuscite di magma, avvenute ogni qualche decina di milioni di anni, e che hanno portato alla formazione di plateau basaltici (*flood basalts*), sono da considerarsi, per i loro effetti sull'ambiente, tra le possibili responsabili di estinzioni di massa nel Fanerozoico, dato che possono essersi protratte anche per un milione di anni (Clapham e Renne 2019).

6. Frisch (2006) ha raccolto diversi articoli riguardanti l'ambiente galattico e la sua influenza sulla Terra. Nei lavori dedicati alle estinzioni di massa, si cerca da un lato di mostrare l'evidenza della periodicità collegandola ad effetti di bursts ed esplosioni di supernovae (Melott e Bambach 2014; Melott 2015), e dall'altro lato invece di escluderla data la sua scarsa consistenza, utilizzando criteri statistici (Bailer–Jones 2009; Feng 2015). Napier (2015), invece di asteroidi e comete di Oort, suggerisce l'impatto di comete giganti appartenenti ai Centauri.

1.2.2. *La dinamica*

Praticamente tutti gli esperti assumono, almeno come ipotesi di lavoro, una qualche dipendenza del clima da parametri astronomici, con tempi–scala definiti dagli effetti gravitazionali dei pianeti, oltreché del Sole e della Luna, sull'orbita della Terra. È il livello di insolazione, cioè la quantità di radiazione ricevuta sulla Terra, che risulta modificato, a causa della variazione della distanza Sole–Terra e dell'orientazione dell'asse di rotazione terrestre. A sua volta, la variazione di insolazione influisce sul clima e quindi sull'ambiente. Come illustreremo nel Capitolo II, la regolarità dei cicli astronomici è utilizzata per calibrare temporalmente ad alta risoluzione anche gli strati geologici di centinaia di milioni di anni fa.

Di solito, si pensa al Sistema Solare come a una specie di giostra dotata di un moto uniforme, regolare; invece, c'è poco di uniforme e costante: anche i parametri orbitali della Terra cambiano (lentamente) col tempo. In *Figura 1.1.a* mostriamo l'orbita della Terra intorno al Sole (*S*) o eclittica. L'asse ortogonale al piano dell'eclittica è diretto al Polo Q dell'orbita. L'asse di rotazione della Terra è diretto invece verso il Polo celeste nord N, ed è inclinato rispetto alla direzione del Polo Q di un angolo ε, l'obliquità dell'eclittica (*Figura 1.1.b*). L'asse compie una rotazione nell'arco di un ciclo precessionale di circa 26 ka (precessione astronomica), e nel contempo, ε oscilla con un periodo di circa 41 ka tra 22.1 e 24.5 gradi. L'eclittica è di forma leggermente ellittica, e la sua eccentricità e ha un valore che oscilla tra circa 0.05 e 0, con tempi scala di molte decine di migliaia e centinaia di migliaia di anni. I piani dell'eclittica e dell'equatore terrestre si intersecano lungo la linea degli equinozi (Equinozio di primavera–γ, dove γ è il punto vernale). L'angolo tra questa e la direzione del perielio (ω) è la longitudine del perielio, mentre l'incrocio tra la retta ortogonale a Equinozio di primavera–γ e l'orbita indica la posizione dei solstizi. L'eclittica ruota sul suo piano intorno al Sole con periodo un po' più lungo di 100 ka. L'effetto combinato della precessione astronomica e della rotazione del piano (spostamento del perielio) dà origine alla precessione climatica: le stagioni "ruotano" (*Figura 1.2*); il prodotto $e \sin\omega$ viene usato come indice precessionale. Infine, il piano dell'eclittica oscilla leggermente rispetto al piano medio delle orbite planetarie del Sistema Solare (cioè, la sua inclinazione i varia), e

la retta d'intersezione tra i due piani (linea dei nodi) ruota lentamente (*Figura 1.1.c*).

Per studiare la dinamica della Terra, un tempo si risolvevano le equazioni della meccanica celeste usando metodi numerici e approssimazioni, e ciò prima dell'introduzione delle tecniche di integrazione diretta, facilitate dal progresso informatico. L'espansione in potenze di tempo comunemente usata in passato è applicabile solo per un intervallo temporale poco esteso intorno all'epoca attuale. Con formule trigonometriche, che approssimano i risultati dell'integrazione diretta, si ottengono risultati meno precisi, ma hanno validità molto più ampia rispetto all'espansione in potenze di tempo. Nei nostri esercizi (Antonello 2016a) abbiamo utilizzato le espressioni trigonometriche di Berger (1976) e Berger (1978) relative agli ultimi milioni di anni. Per epoche più lontane, discusse nel Capitolo II, abbiamo considerato le soluzioni di Laskar *et al.* (2011a) ottenute dall'integrazione diretta. Però la domanda è: quanto sono effettivamente affidabili i risultati? La verifica, positiva, si può fare solo con le osservazioni astronomiche degli ultimi secoli. Andando molto indietro nel tempo, non ci sono osservazioni disponibili, a parte le antiche registrazioni delle eclissi, e l'unica possibilità è confrontare le varie tecniche tra loro. Non è possibile avere una certezza assoluta su quale sia la tecnica "migliore".

1.3. Insolazione

Il tramite tra le caratteristiche orbitali e lo studio del clima terrestre è il calcolo dell'insolazione, cioè la quantità di radiazione solare ricevuta sulla Terra. Essa dipenderà dalla latitudine della località considerata, dalla data e dall'ora del giorno, a seguito del moto orbitale della Terra su un'orbita ellittica e della sua rotazione attorno all'asse inclinato sull'eclittica. Il valore mediato su un anno, cioè l'energia media per unità di tempo e superficie ortogonale alla radiazione, è chiamato "costante solare", ma in realtà non è costante, e varia, pur se di pochi per mille, a causa dell'attività solare (macchie e facole solari) con un periodo di circa 11 anni e con altri tempi–scala più lunghi[7].

7. Misure effettuate con i satelliti spaziali: ACRIM, SOHO/VIRGO, e oggi SORCE (http://www.acrim.com/). Il valore della costante è di circa 1361 W/m^2.

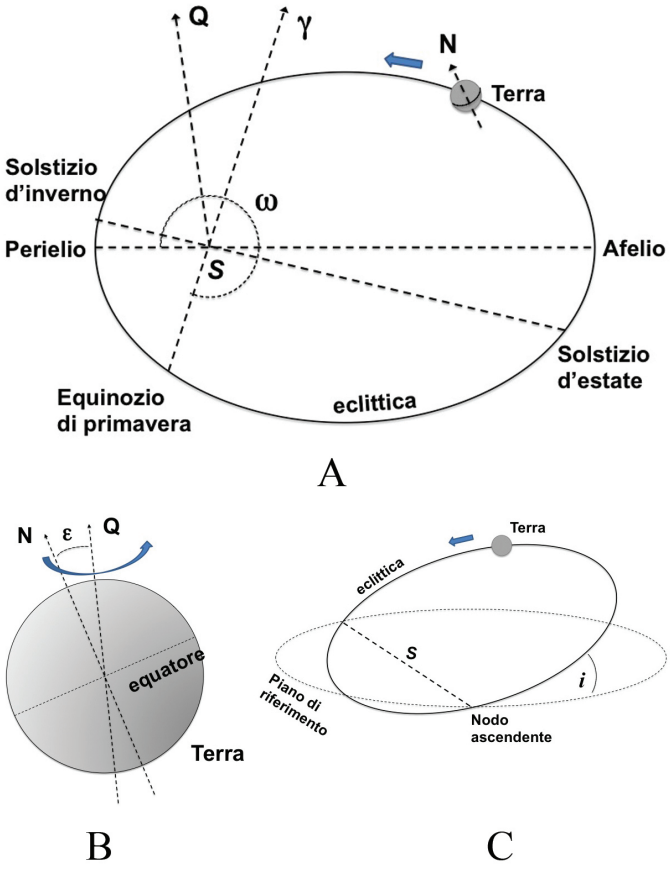

Figura 1.1. Schema dell'orbita terrestre nello spazio. Immagine *a*: la Terra orbita intorno al Sole *S*, e sull'eclittica sono riportati i punti di distanza minore (Perielio) e maggiore (Afelio), la posizione dei Solstizi d'inverno e d'estate, e dell'Equinozio di primavera con la corrispondente proiezione celeste del punto vernale γ; Q indica la direzione del polo dell'eclittica, e ω la longitudine del perielio. Immagine *b*: l'asse di rotazione terrestre diretto verso il Polo Nord celeste N forma un angolo ε (obliquità dell'eclittica) rispetto alla direzione del Polo dell'eclittica Q, e a sua volta effettua una rotazione con periodo di circa 26000 anni (precessione astronomica) cui corrisponde una rotazione della retta Equinozio di primavera–γ sul piano dell'eclittica. Immagine *c*: il piano dell'eclittica è inclinato di un piccolo angolo *i* rispetto al piano di riferimento del Sistema Solare; *i* oscilla lentamente, mentre l'intersezione tra eclittica e piano di riferimento, linea dei nodi (linea tratteggiata), effettua una lenta rotazione.

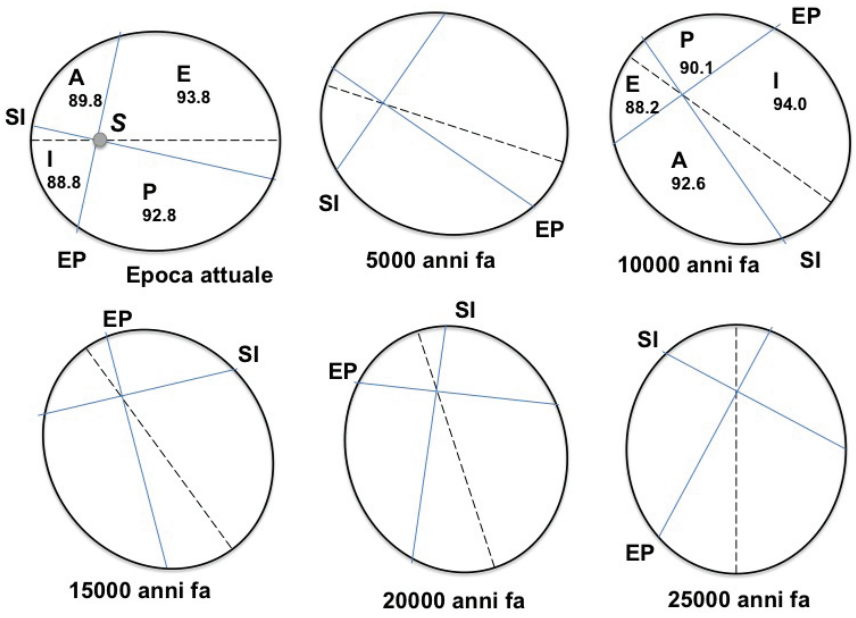

Figura 1.2. L'eclittica, vista nel sistema di riferimento delle stelle fisse, negli ultimi 25000 anni. La linea tratteggiata è l'asse maggiore (linea degli apsidi, perielio–afelio); le altre due rette sono la linea dei solstizi e quella degli equinozi, e dividono l'orbita nelle quattro stagioni astronomiche. Sono indicati l'equinozio di primavera EP, il solstizio d'inverno SI, e le aree corrispondenti all'autunno A, inverno I, primavera P, estate E. In due casi è stata riportata, come esempio, la durata della stagione in giorni; la relazione abbastanza evidente tra durata e area corrispondente dell'eclittica è espressione della seconda legge di Keplero. L'eclittica è vista da Nord, quindi le stagioni climatiche riguardano l'Emisfero Nord; bisogna immaginare una situazione "antisimmetrica" per l'Emisfero Sud. Per facilitare la comprensione, l'ellisse è stata disegnata con una grande eccentricità, e=0.5; l'eccentricità reale però è molto più piccola, ed è variata da circa 0.020 a 0.017. Da notare la rotazione in senso opposto della linea degli apsidi rispetto ai punti equinoziali e solstiziali.

Una volta calcolata l'insolazione, ci si chiede poi come essa vari nel corso dei millenni. Per esempio, possiamo verificare l'energia ricevuta a una certa latitudine a mezzogiorno, in un dato mese, e successivamente confrontare tra loro le serie temporali ottenute per le diverse latitudini. L'analisi viene eseguita con tecniche di Fourier, per trovare i periodi principali presenti nelle serie, cioè i segnali con ampiezza

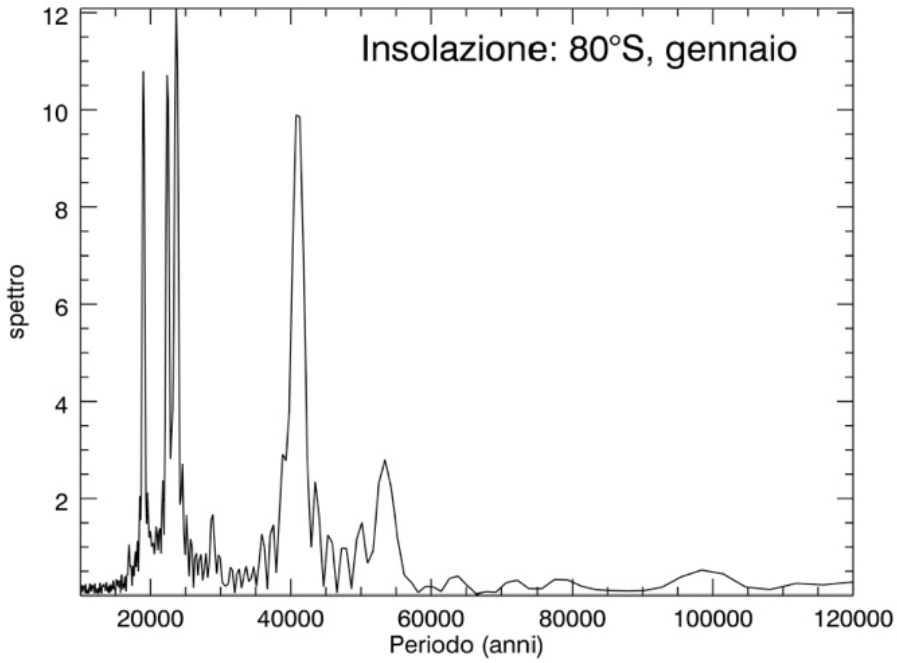

Figura 1.3. Esempio illustrativo di spettro di ampiezza (Lomb–Scargle) per l'insolazione a latitudini antartiche nel mese di gennaio (estate australe; valori dell'insolazione calcolati da A. Berger e relativi a 1 milione di anni). I tre picchi principali tra circa 19 ka e 23 ka sono dovuti alla precessione climatica; l'altro picco, 41 ka, è dovuto all'obliquità dell'eclittica.

maggiore e quindi più significativi. I periodi risultanti nell'ultimo milione di anni (*Figura 1.3*) sono quelli della precessione climatica, circa 19 ka–23 ka, e quello dell'obliquità dell'eclittica, circa 41 ka. L'effetto dell'eccentricità, circa 95–123 ka e 400 ka, è piccolo[8]. Per comprendere alcuni risultati degli studi paleoclimatici sarà importante ricordare che gli effetti della precessione climatica sull'insolazione si annullano presso i Poli, mentre gli effetti dell'obliquità sono praticamente nulli all'equatore e crescono andando verso i Poli.

Durante l'Ottocento si cominciarono a fare delle ipotesi sui possibili legami tra la variazione dei parametri orbitali e i periodi glaciali come si andavano deducendo dallo studio della geologia. Milanko-

8. Si veda la tabella in *Tabella 2.2* a p. 62 per intervalli maggiori del milione di anni.

vitch, negli anni intorno al 1941, aveva raccolto in un trattato i suoi studi sulla teoria che interpretava l'alternarsi delle ere glaciali con l'andamento dell'insolazione. Però non fu possibile compiere delle verifiche adeguate delle sue previsioni, finché non iniziarono i carotaggi dei fondali oceanici negli anni Cinquanta–Sessanta del secolo scorso, con i primi contributi di Cesare Emiliani che, dopo la seconda guerra mondiale, si era trasferito da Bologna negli Stati Uniti e vi aveva sviluppato la paleo–oceanografia (p.es.: Emiliani 1955).

Il lavoro oggi considerato il riferimento di base delle conferme della teoria di Milankovitch e dei suggerimenti per un suo miglioramento è quello di Hays, Imbrie e Shackleton (1976). Ricordiamo che allora c'erano diverse ipotesi riguardo i cicli osservati in geologia. Quelle di origine esterna includevano la variazione di emissione della radiazione solare, o il suo assorbimento da parte di polvere interstellare, oppure l'effetto della polvere vulcanica contenuta nell'atmosfera, o la variazione del campo magnetico terrestre. Quelle di origine interna al sistema del clima erano legate alla crescita e diminuzione degli strati di ghiaccio nell'Artico, o in Antartide, e alla circolazione profonda delle acque oceaniche. Oppure era il sistema climatico stesso che alternava stati diversi al proprio interno, senza necessità di interventi esterni. Solo la teoria orbitale di Milankovitch ha però prodotto delle previsioni per un confronto quantitativo con i dati osservati, e ha avuto un impressionante successo, anche se non spiega tutte le osservazioni in dettaglio. Già Hinnov (2000; p. 421) ricordava che la letteratura degli anni Ottanta e Novanta era piena di innumerevoli pubblicazioni che indicavano questo meccanismo come probabilmente quello principale alla base di molte formazioni stratigrafiche cicliche di tutte le età geologiche.

La risposta del sistema–clima alle variazioni di insolazione è generalmente intesa come un processo non–lineare molto complesso, di cui non si conoscono (ancora) bene i dettagli. Si tratterebbe di effetti *feedback* (retroazione) sul sistema stesso, o di amplificazione di un segnale intrinsecamente piccolo, oppure di accumulo di una quantità fisica piccola su un lungo intervallo di tempo fino a un valore di soglia. E pur essendo in sé piccole, queste quantità e variazioni possono portare col tempo a una risposta macroscopica e globale del sistema–clima, come le glaciazioni.