



**PLS Virtual Summer
School for Students
PVS3**

**Atti della Scuola PVS3
2020**

Variazioni climatiche del passato: come si studiano e cosa ci insegnano per il futuro

Alessandro Iannace, Valentino Di Donato

Dipartimento di Scienze della Terra, dell'Ambiente e delle Risorse, Università di Napoli Federico II.

Abstract

La Geologia classica ha insegnato già nell'800 che la Terra ha subito delle variazioni climatiche importanti nel corso della propria storia ed in particolare le grandi glaciazioni del Pleistocene. A lungo si è pensato che tali fenomeni fossero il risultato di variazioni di insolazione determinate da variazioni dei parametri orbitali secondo un modello matematico elaborato da Milutin Milankovitch esattamente 100 anni fa. Tuttavia, solo la nascita della moderna paleoclimatologia, per merito di Cesare Emiliani, ha consentito di dimostrare in maniera quantitativa nel 1976 questa ipotesi con lo studio delle variazioni isotopiche nei sedimenti di mare profondo. A partire dagli anni '80 l'approfondimento di questi studi ha mostrato anche che esistono cicli ed eventi di variazione climatica molto bruschi e di breve durata, mostrando che il sistema climatico è un sistema complesso controllato da molteplici variabili e da meccanismi di retroazione. Al tempo stesso lo studio delle carote di ghiaccio ha consentito di mostrare che la percentuale di CO₂ nell'atmosfera ha raggiunto negli ultimi anni valori mai sperimentati dal Pianeta nell'ultimo milione di anni.

Introduzione. La geologia classica e la ricostruzione del passato

Un cambiamento climatico che interessi l'intero pianeta, cioè che sia globale, può sembrare un'idea del tutto scontata ad un cittadino del ventesimo secolo, a prescindere dalle distinzioni che possono essere fatte se tale cambiamento sia naturale o indotto dalle attività umane. Raramente però riflettiamo sul fatto che se oggi siamo in grado di immaginare degli scenari di cambiamenti che interessano l'intero pianeta e perché lo studio della storia del pianeta stesso ci ha mostrato che tali cambiamenti sono avvenuti nel passato.

Lo studio scientifico sistematico del pianeta terra, e soprattutto della sua storia, cioè la geologia, è iniziato alla fine del '700. Ma già nella prima metà dell'800 furono raccolte le evidenze che la Terra ha conosciuto nel recente passato un momento nel quale le calotte glaciali ricoprivano gran parte del nord Europa e del Nord America. L'era glaciale, come l'abbiamo conosciuta fin da allora, fu una scoperta di un paleontologo svizzero trapiantato negli Stati Uniti, Louis Agassiz. Questa coraggiosa ricostruzione, che non riscontrò immediatamente il favore degli scienziati dell'epoca, era basata sulla raccolta di meticolose osservazioni effettuate nella pianura Svizzera a nord delle Alpi. Qui erano noti da tempo enormi blocchi di roccia isolati nella piatta campagna (Fig. 1), di composizione molto diversa dalle rocce circostanti, e per i quali era difficile individuare la sorgente. Montagne con la stessa composizione di tali blocchi erano lontani molti chilometri nelle aree più interne delle Alpi. Agassiz ritenne che l'unico modo di trasportare dei blocchi così giganteschi fosse quello di farli viaggiare inglobati in un ghiacciaio in modo tale che allo scioglimento di questo potessero essere depositi nella campagna ai piedi delle Alpi. Altro elemento fondamentale per tale ricostruzione fu l'osservazione che su tali massi erano presenti le caratteristiche strie che il movimento dei ghiacciai imprime nelle rocce sulle quali scorrono. Infine, nelle stesse aree era possibile osservare grandi accumuli di ciottoli in forma di grandi dorsali arcuate, le morene, del

tutto simili a quelli che si trovano sul fronte dei ghiacciai attuali. Agassiz ebbe modo di effettuare osservazioni simili anche in Nord America ed in Scozia, accompagnato dai maggiori geologi dell'epoca. Il suo scenario apocalittico di una terra molto più fredda dell'attuale fu contrastato dal più influente geologo dell'epoca, Charles Lyell, il quale era riluttante ad ammettere spiegazioni di fenomeni passati che non facessero riferimento allo stato attuale della terra. Ma lo stesso Lyell, verso la fine della sua esistenza, dovette ammettere che la ricostruzione di Agassiz corrispondeva al vero.

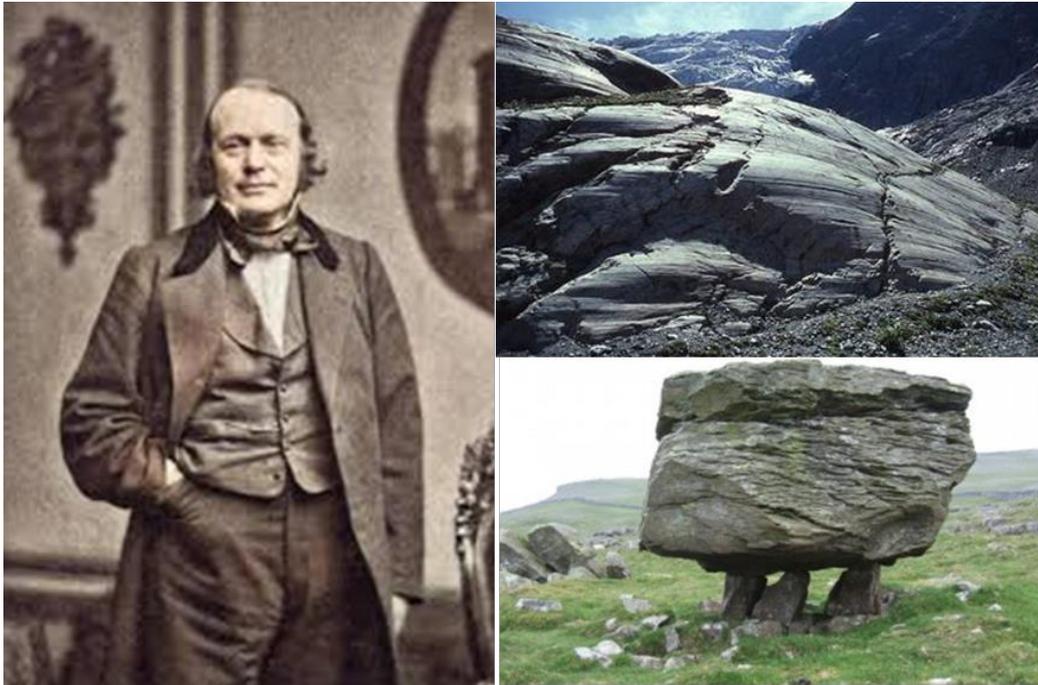


Figura 1. Louis Agassiz e, in alto a destra rocce striate dal movimento dei ghiacciai nelle Alpi e blocchi erratici nella campagna scozzese.

Nei primi anni del '900, i tedeschi Penk e Bruckner, attraverso osservazioni più sistematiche in Baviera nella valle del Danubio, perfezionarono l'ipotesi di Agassiz. Essi individuarono, studiando i depositi detritici lasciati da ghiacciai e fiumi nelle valli affluenti del Danubio, le tracce di almeno quattro successivi grandi periodi glaciali intervallati da altrettante fasi dette interglaciali. Dai nomi di tali valli essi vennero denominati Gunz, Mindel, Riss, Wurm, nomi che sono rimasti nell'uso corrente fino a qualche anno fa.

Che variazioni climatiche periodiche potessero avere avuto luogo sulla terra era in realtà un'ipotesi che i geologi avevano formulato da molto tempo. Anzi, ad esser precisi, il primo ad aver avanzato una tale ipotesi e più noto per la sua fondamentale attività di chimico che per quella di geologo. Stiamo parlando di Antoine Lavoisier, riconosciuto come il fondatore della chimica moderna, e caduto vittima della Rivoluzione francese per la sua attività di esattore delle tasse. Lavoisier fu il redattore di una carta mineralogica della Francia commissionata per la ricerca delle risorse minerarie. Nel corso di tale lavoro egli notò che spesso gli strati rocciosi presentano delle alternanze di ghiaie e di sabbie fini, che attribuì a processi di deposizione marina avvenuti rispettivamente vicino alla costa e lontano da essa. Da ciò dedusse l'idea di una ciclica variazione del livello del mare e ne ipotizzò un controllo climatico. Questa osservazione era incredibilmente in anticipo sui tempi: solo nella seconda metà dell'Ottocento diversi geologi attribuirono simili alternanze nella

tipologia di strati sedimentari a variazioni cicliche del clima, per le quali non si disponeva di una causa né di una datazione.

Agli inizi del '900 venne elaborata la teoria che poi avrebbe dovuto fornire la causa di tali catastrofiche variazioni climatiche. Si tratta di un modello matematico elaborato da Milutin Milankovitch, professore all'università di Belgrado. Milankovitch decise di affrontare il tema della teoria matematica dei fenomeni termici prodotti dalla radiazione solare e, come applicazione del suo metodo, calcolò le variazioni temporali della quantità di radiazione che investe la terra nel corso del tempo. Questa è certamente la parte meglio nota dell'opera di Milankovitch, pubblicata nel 1920 e scritta quasi interamente durante la prigionia che lo scienziato dovette affrontare durante la Prima guerra mondiale nelle prigioni austro-ungariche. Il modello di Milankovitch si basa sulla conoscenza delle varie azioni che subisce il moto della Terra durante la sua rivoluzione intorno al sole. Tale variazione sono:

- ellitticità dell'orbita, con un periodo di circa 100.000 anni;
- inclinazione dell'asse terrestre, con un periodo di circa 40.000 anni;
- precessione degli equinozi, un moto complesso con un periodo di circa 21.000 anni.

Secondo i calcoli di Milankovitch la composizione nel corso del tempo di tali variazioni (Fig. 2) comporterebbe una drastica e corrispondente variazione della quantità di energia solare intercettata dalla Terra alle medie latitudini. Fu immediatamente chiaro come queste variazioni potessero essere la causa dell'alternarsi di fasi glaciali ed interglaciali deducibili dalle osservazioni geologiche ma in quell'epoca non esistevano le condizioni per verificare quantitativamente tale modello.

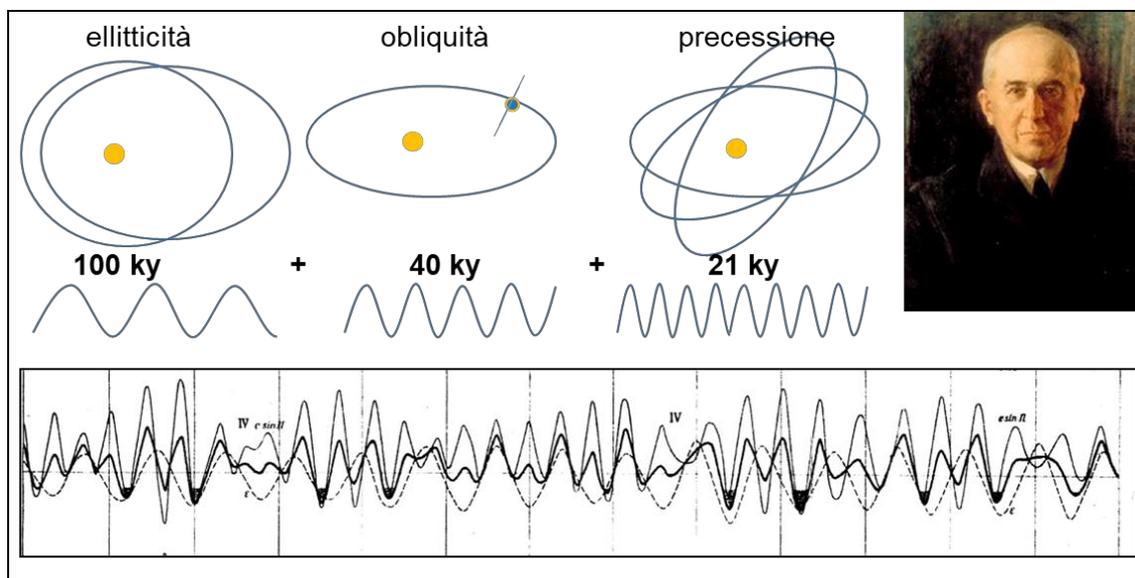


Figura 2. Dalla combinazione dei moti millenari si ottengono le variazioni della insolazione solare alle diverse latitudini nel tempo. Per Milankovitch sono cruciali i valori dell'insolazione estiva nell'emisfero boreale a circa 65°N di latitudine. Si tratta di quelle regioni, occupate da continenti, che risultano rispettivamente occupate o libere da calotte nei periodi glaciali e interglaciali. Bassi valori di insolazione estiva determinano uno scioglimento solo parziale delle nevi, innescando reazioni di feed-back legate all'aumento dell'albedo (riflettanza complessiva del Pianeta).

I sedimenti oceanici e la verifica dell'ipotesi di Milankovitch

La nascita della moderna paleoclimatologia ha dovuto però attendere gli anni '50 del '900. Questo non solo perché erano necessarie delle datazioni quantitative dei fenomeni geologici ma soprattutto perché essa è stata resa possibile dallo studio dei sedimenti marini profondi. L'esplorazione degli oceani, ed in particolare del fondo oceanico e della sua topografia, fu avviato immediatamente dopo la fine della Seconda guerra mondiale dal governo degli Stati Uniti per motivi di sicurezza nazionale. Cospicui finanziamenti vennero affidati a geologi e geofisici di diverse istituzioni di ricerca americane sotto la guida del Office of Naval Research.

Ma la scintilla fondamentale per innescare l'esplosione di una nuova e fondamentale disciplina venne dalle ricerche effettuate, sempre per motivi militari, nei laboratori di fisica nucleare dell'università di Chicago, quelli dove aveva operato l'italiano Enrico Fermi per mettere a punto le prime pile atomiche e, ahimè, la prima bomba atomica. La preparazione dei reattori nucleari prevede l'uso della cosiddetta acqua pesante, un'acqua cioè nella quale gli atomi di idrogeno sono costituiti prevalentemente dalla specie isotopica denominata deuterio, cioè un isotopo contenente anche un neutrone rispetto all'atomo "normale" di idrogeno, il prozio, il cui nucleo è costituito da un solo protone. È proprio il neutrone del deuterio a rendere l'acqua più pesante e a presentare anche diverse altre caratteristiche fisiche diverse. Anche nel caso dell'ossigeno, che ha massa atomica prossima a 16, una piccola percentuale di atomi possiede uno o due neutroni in più e questi vanno a costituire isotopi di massa 17 e 18. Il premio Nobel della fisica Harold Urey scoprì che durante le normali reazioni chimiche, o durante processi fisici e biochimici, specie atomiche che passano da una molecola ad un'altra vengono "frazionate" durante il processo. Per esempio, il carbonio di un tessuto organico ha una composizione isotopica diversa dal carbonio presente nel carbonato di calcio di una conchiglia marina. Urey scoprì anche che in genere l'entità di questo frazionamento, in particolare quello del ^{18}O rispetto al ^{16}O , dipendono dalla temperatura: a temperature più basse in genere il processo di frazionamento è più accentuato (Fig. 3).

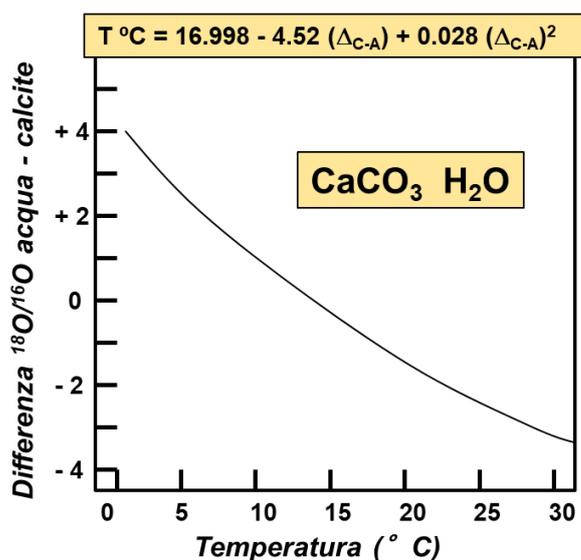


Figura 3. La composizione isotopica del carbonato che cristallizza in acqua è in relazione con quello dell'acqua stessa e con la temperatura: al diminuire della temperatura, il suo rapporto $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ sarà via via più distante da quello dell'acqua.

Quando una tale scoperta fisica arrivò all'orecchio dei primi geologi si pensò immediatamente di applicarla a calcolare le paleo-temperature del pianeta. Per diversi anni si sperimentò utilizzando diversi fossili, quali le ammoniti e le belemniti del Mesozoico, con l'idea che fossili depositi durante fasi più calde dovessero avere una composizione isotopica dell'ossigeno più leggera di fossili depositi durante fasi fredde. Questi tentativi però non diedero risultati di rilievo. Fu invece un giovane ricercatore dell'università di Bologna trapiantato a Chicago, Cesare Emiliani, che ebbe l'idea di misurare la composizione isotopica di conchiglie di organismi dei quali lui era uno specialista, i foraminiferi, prelevati però non in rocce molto antiche ma nei sedimenti degli oceani profondi. I foraminiferi sono organismi unicellulari, protisti, che costituiscono una significativa percentuale del plancton marino di tutti gli oceani. Emiliani studiò tre "carote" di sedimenti di diversi bacini oceanici. Con il termine carote si intende una sezione circolare dei sedimenti oceanici di qualche metro, o anche qualche centinaio di metri di lunghezza, ottenuta immergendo un carotiere perpendicolarmente al fondo dell'oceano (Fig. 4). Emiliani campionò i foraminiferi contenuti in queste carote partendo dai più recenti, cioè quelli presenti nei sedimenti superficiali, via via verso il basso fino a raggiungere quelli più antichi sulla parte inferiore della carota. Misurando la composizione isotopica del carbonato di calcio dei gusci dei foraminiferi osservò che questa mostrava delle oscillazioni periodiche dall'alto verso il basso. Lo spessore delle carote campionate da Emiliani era relativamente modesto, solo pochi metri, ma lo scienziato italiano aveva a disposizione una datazione assoluta per almeno una di esse. Fu così in grado di dimostrare che negli ultimi 300.000 anni c'erano state almeno tre oscillazioni glaciale/interglaciale. Questo mandava in soffitta le precedenti ricostruzioni che prevedevano quattro fasi glaciali che coprivano l'intero Quaternario, per il quale ora si disponeva una datazione di circa due milioni di anni. Ma soprattutto poneva le basi della moderna paleoclimatologia, fondata sullo studio quantitativo biologico e chimico dei sedimenti di mare profondo.

Bisogna dire che il punto fondamentale dell'interpretazione di Emiliani, pubblicata nel 1955 nel *Journal of Geology*, fu contestato fin dall'inizio da molti scienziati dell'epoca. In effetti, la spiegazione delle variazioni isotopiche in termini di variazione di temperatura delle acque superficiali dell'oceano non era l'unica possibile. Fu fatto osservare che in un mondo glaciale il volume dei ghiacci terrestri intrappola una frazione significativa dell'acqua del sistema Terra, contenuta prevalentemente negli oceani. Poiché nell'acqua dei ghiacciai è concentrato in prevalenza l'isotopo 16 dell'ossigeno, aumentare a dismisura i ghiacciai significa (Fig. 5) arricchire indirettamente l'oceano di ossigeno 18 (^{18}O). Pertanto, le variazioni osservate nel tempo nei gusci dei foraminiferi potevano essere spiegate semplicemente con una variazione di composizione isotopica dell'acqua di mare. Questa diatriba non poté essere risolta per diversi anni. Bisognò aspettare il 1973 quando un ricercatore britannico, Neils Shackleton, fu in grado di misurare, grazie a uno spettrometro di nuova concezione, sia i foraminiferi platonici sia quelli bentonici contenuti in uno stesso campione di sedimento. Lo studio di Shackleton dimostrò che i foraminiferi planctonici e quelli bentonici registravano le stesse variazioni isotopiche. Poiché non è possibile che durante le variazioni glaciale /interglaciale le variazioni di temperatura delle acque superficiali possano essere state della stessa entità di quelle delle acque presenti sul fondo dell'oceano, Shackleton concluse che le variazioni osservati da Emiliani dovessero essere interpretate in gran parte come riflesso delle variazioni di composizione isotopica dell'acqua dell'oceano. E queste erano da mettere in relazione diretta col volume dei ghiacci. Lo stesso Schackleton concluse che ciò non faceva altro che rafforzare il valore paleo-climatico della interpretazione di Emiliani. Questo lavoro consacrava il

metodo degli isotopi dell'ossigeno come il registratore fondamentale del volume dei ghiacci presenti in un determinato momento sul pianeta.

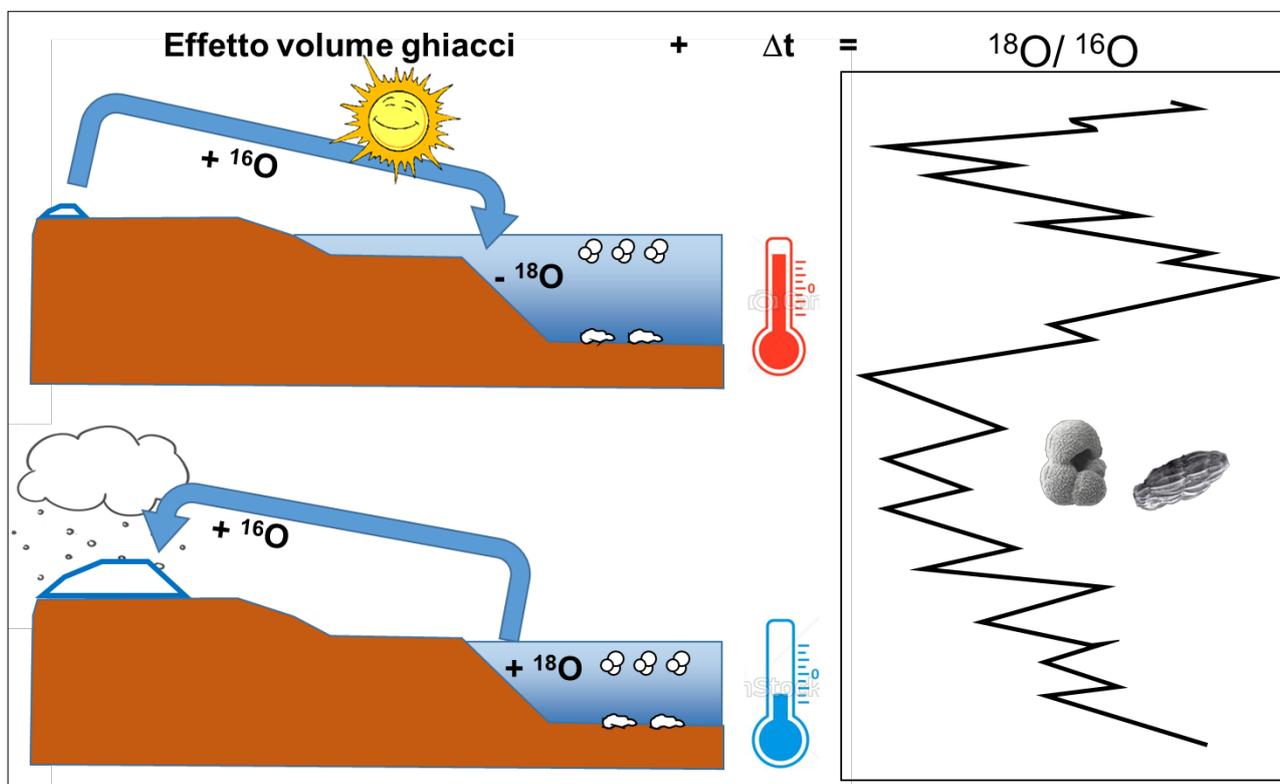


Figura 4. Il cambiamento del $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ nel carbonato biogenico marino è connesso non solo a variazioni di temperatura ma anche variazione del volume dei ghiacci continentali. In effetti si ritiene che la variazione nel delta isotopico registrata tra l'ultimo periodo glaciale e l'attuale interglaciale sia riconducibili per circa il 70% al volume dei ghiacci. Il restante 30% è riconducibile alla variazione delle temperature e, regionalmente, a variazioni di salinità.

Ma la prima, sensazionale applicazione del nuovo metodo paleoclimatologico fu quella di poter dimostrare definitivamente l'ipotesi di Milankovic. Nel 1976 lo stesso Shackleton, insieme all'oceanografo William Hay e al matematico John Imbry, effettuò l'analisi di tre diversi parametri chimici e paleontologici in una carota oceanica. Tali parametri erano le variazioni nel corso del tempo del rapporto $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ e del contenuto in foraminiferi planctonici e in radiolari, altri organismi planctonici ma aventi un guscio costituito da silice. Tale studio dimostrò, attraverso l'applicazione del metodo matematico dell'analisi di Fourier, che tutti questi parametri subivano nel corso del tempo delle variazioni cicliche nelle quali erano riconoscibili delle frequenze di circa 100.000, 40.000 e 21.000 anni, cioè esattamente le variazioni dei parametri orbitali presi in esame da Milankovic. Questo lavoro, pubblicato sulla rivista scientifica Science, deve essere considerato una pietra miliare della scienza del '900 in quanto dimostra in maniera inequivocabile quali sono i controlli fondamentali del clima terrestre.

I sedimenti oceanici e la storia climatica del Terziario

In ogni caso, Emiliani già a partire dagli anni '50 era diventato il più fervido sostenitore della necessità di lanciare un grande progetto di investigazione dei sedimenti dei fondali oceanici per ricostruire la storia della terra. Tale progetto si concretizzò nel 1968 ma solo grazie alla spinta rappresentata dalla necessità di dimostrare la veridicità di una teoria elaborata nel corso degli anni 60, quella che sarà nota poi come teoria della tettonica a zolle o tettonica globale.



Figura 5. Le carote di sedimenti recuperate in mare profondo nel corso delle campagne oceanografiche vengono sezionate, descritte e campionate per gli studi successivi già a bordo. Dopo vengono conservato (in basso a destra il sito di stoccaggio di Brema, in Germania) in quanto costituiscono un fondamentale archivio di informazioni riguardanti l'evoluzione climatica della Terra nel corso di milioni di anni.

L'enorme mole di informazioni ricavate dallo studio di tali sedimenti ha consentito di definire con grande dettaglio le vicissitudini climatiche dell'intera Era Terziaria, cioè degli ultimi 65 milioni di anni (Fig. 6). Le principali informazioni ricavate da tali studi, e sulle quali c'è la concordia di tutta la comunità scientifica, possono essere così riassunte:

- 1) dall'inizio del Cenozoico ad oggi c'è stato un progressivo raffreddamento del clima interrotto soltanto da un momento più caldo tra la fine del Paleocene e l'inizio dell'Eocene (evento PETM);
- 2) il raffreddamento progressivo è stato però scandito anche da una serie di bruschi raffreddamenti, denominati *shift* isotopici, dei quali i più importanti sono avvenuti intorno 35, 5, 3,4, 2,4 e 0.9 milioni di anni;
- 3) Le variazioni glaciali classiche hanno interessato gli ultimi 900.000 anni e sono consistite in 23 stadi glaciali interglaciali, con cicli che hanno avuto una durata approssimativa di circa 100.000 anni;

4) Prima di 900.000 anni fa le oscillazioni climatiche erano dominate da cicli con una frequenza maggiore, quella di circa 40.000 anni connessa alle variazioni di inclinazione dell'asse, ed erano meno estreme.

Se queste tappe delle variazioni climatiche globali sono molto ben definite, più controversa è la loro spiegazione. In particolare, non sempre è facile individuare il motivo dei bruschi raffreddamenti indicati dagli *shift* isotopici. Molti ritengono che, per esempio, il raffreddamento avvenuto circa 35 milioni di anni fa sia stato causato dall'inizio della costruzione della calotta glaciale antartica. Questo evento è stato probabilmente innescato dalla definitiva separazione dell'Antartide (Fig. 6) da tutti gli altri continenti, ed in particolare dal Sudamerica. L'apertura dello stretto di Drake tra Patagonia e Antartide ha consentito l'instaurarsi di una corrente fredda permanente, la corrente circum-antartica, che ha posto il continente antartico in una condizione di isolamento termico che ha favorito l'accrescimento delle calotte glaciali. Molto più di recente, circa tre milioni e mezzo di anni fa, i processi tettonici avrebbero portato al sollevamento delle catene centro-americane e quindi alla creazione dell'istmo di Panama, tra Nord America e Sud America (Fig. 6). Tale processo ha portato all'isolamento del Mar dei Caraibi, la zona di origine della corrente del Golfo. È noto che la corrente del Golfo trasporta calore nelle regioni settentrionali europee ma al tempo stesso trasporta anche un elevato grado di umidità. Un aumento della umidità è responsabile dell'aumento delle precipitazioni nevose ai poli che hanno innescato la formazione della calotta glaciale artica. Molto più controversa è invece la spiegazione dell'evento che ha determinato la brusca variazione di modalità climatica di circa 900.000 anni fa, quello che ha condotto alla tipologia di clima che la Terra sta ancora sperimentando.

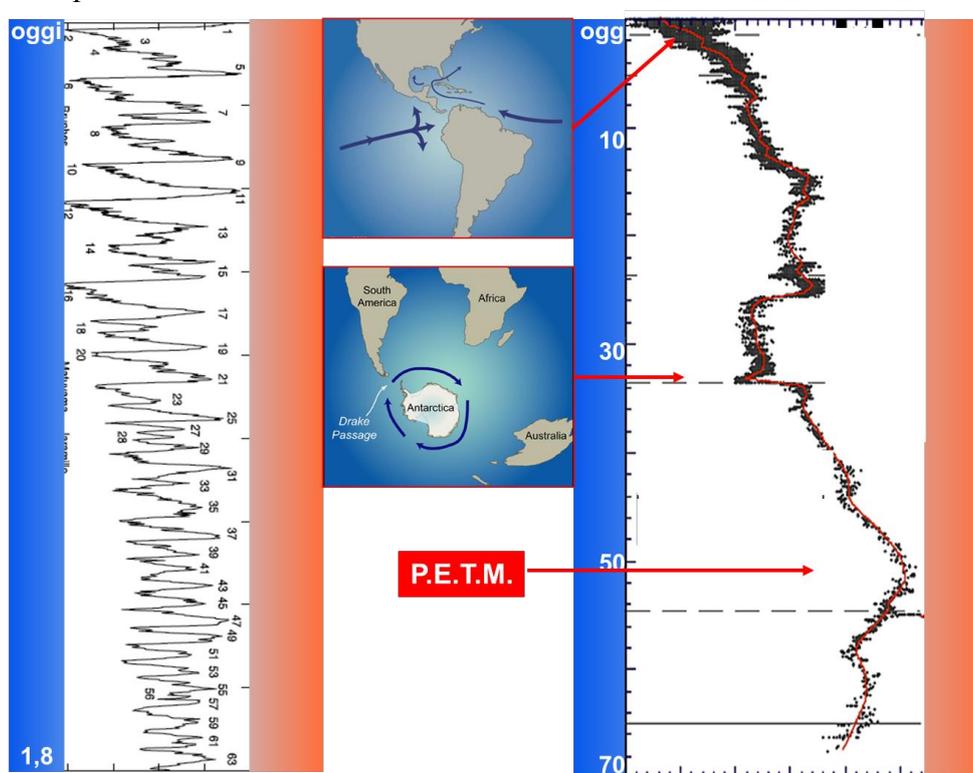


Figura 6. Sulla sinistra il dettaglio dei cicli glaciali degli ultimi 1,8 milioni di anni. Sulla destra le variazioni del Cenozoico con indicati i tre maggiori eventi climatici: il massimo termico della transizione Paleocene-Eocene, l'inizio delle glaciazioni antartiche e l'inizio delle glaciazioni artiche.

Gli eventi climatici naturali di breve durata

Un altro importantissimo campo di applicazione degli studi sugli isotopi stabili dell'Ossigeno e dell'Idrogeno è rappresentato dall'analisi delle carote di ghiaccio. Le calotte groenlandese e antartica sono state perforate con lo scopo di ricostruire l'evoluzione paleoclimatica nel corso degli ultimi cicli glaciale interglaciale. La composizione isotopica del ghiaccio è infatti in relazione con la temperatura: a temperature più basse corrispondono minori concentrazioni di ^{18}O e ^2H . Le carote di ghiaccio, anche se non consentono di andare indietro nel tempo quanto le successioni marine – la carota EPICA Dome C in Antartide raggiunge circa 800.000 anni, mentre per la Groenlandia record continui coprono gli ultimi 130.000 anni – forniscono un record paleoclimatico di estremo dettaglio. Ad esempio, è stato appurato che durante il periodo glaciale più recente, l'area del Nord Atlantico ha subito una serie di drammatiche fluttuazioni climatiche note come Eventi Dansgaard-Oeschger, durante i quali le condizioni oceaniche e atmosferiche si sono alternate tra intervalli pienamente glaciali (i cosiddetti stadiali, cui è stata attribuita sigla GI) e intervalli relativamente temperati (i cosiddetti interstadiali - GS). Negli ultimi 115.000 anni sono stati riconosciuti 25 cicli interstadiale-stadiale. Gli stadiali sono diversi per intensità e durata, tuttavia essi sembrano caratterizzati da condizioni nel complesso più aride e da maggiore intensità dei venti, come indicato dall'incremento della concentrazione nel ghiaccio dello ione calcio, che è in relazione con il carico di polvere atmosferica.

La imprevedibilità della variabilità climatica nel corso dell'ultimo periodo glaciale è anche espressa nei cosiddetti eventi di Heinrich. Nei sedimenti fini dell'Atlantico settentrionale si rinvengono di tanto in tanto livelli caratterizzati da una elevata proporzione dei piccoli ciottoli di rocce di origine continentale (Fig. 7). La presenza di ciottoli in sedimenti fini è interpretata come dovuta allo scioglimento di grandi iceberg che incorporavano questo detrito e che si erano spinti evidentemente più a sud del "normale" durante eventi freddi. La dinamica di questi eventi, denominati con sigla HE e un numero progressivo, non è ancora del tutto chiarita. Essi ricadono all'interno di stadiali e sembrano precedere immediatamente il brusco riscaldamento che si registra al passaggio da stadiali ad interstadiali; il rilascio di grandi iceberg sarebbe in relazione alla destabilizzazione dei margini delle calotte – principalmente della calotta Laurentide che occupava gran parte del Nord America fino alle latitudini dell'attuale New York.

Tra gli stadiali, merita attenzione quello tradizionalmente denominato Dryas Recente, il cui nome deriva da *Dryas octopetala*, un fiore selvatico presente negli ambienti montani e della tundra, e il cui polline è abbondante in alcuni livelli stratigrafici. Si tratta di un intervallo freddo durato circa 1200 anni (tra circa 12.900 e 11.700 anni fa) che ha una importante espressione nelle carote della Groenlandia (dove è identificato come stadiale GS-1) e in generale nell'emisfero boreale, ivi inclusa l'area mediterranea. Questo evento interruppe in maniera brusca e anomala la deglaciazione che si era decisamente avviata a partire da ca. 15000 fa. (Fig. 8) Un aspetto particolare di questo stadiale è rappresentato dalla sua collocazione in una fase caratterizzata da un incremento dell'insolazione estiva nell'emisfero boreale, per cui le sue cause non possono essere ricercate nel *forcing* astronomico. Tra le ipotesi formulate per individuarne le cause la più accreditata prevede

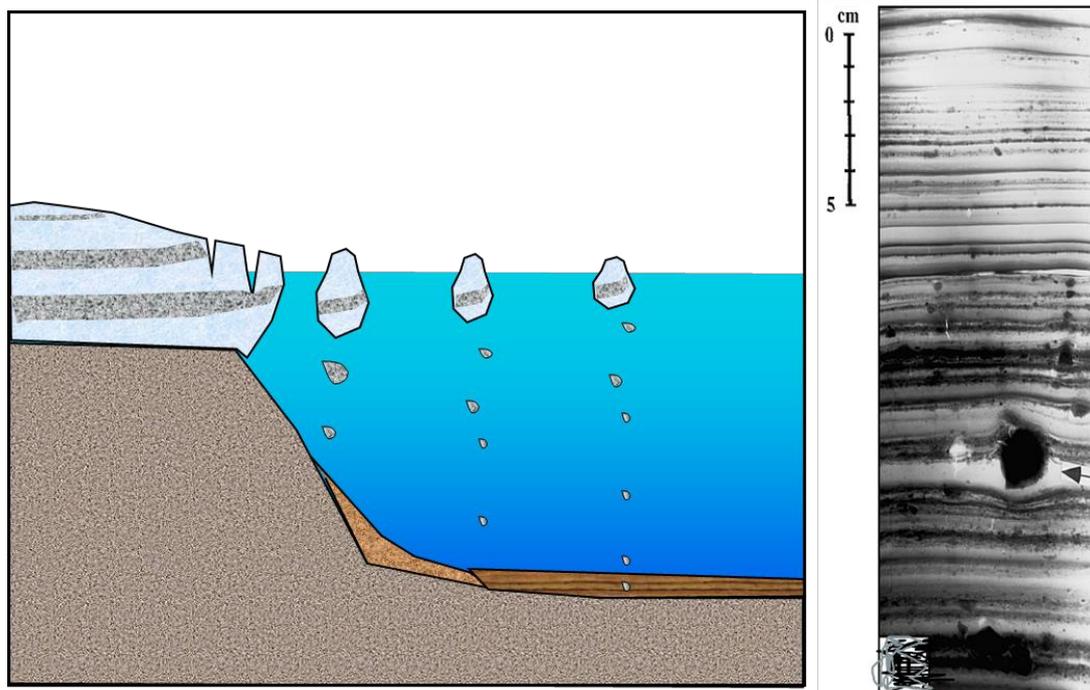


Figura 7. Gli eventi di Heinrich sono in relazione con la presenza, in depositi dei fondali dell'Oceano Atlantico, di detriti di origine glaciale rilasciati da grandi iceberg prodotti dalla destabilizzazione delle calotte continentali.

un improvviso e massiccio afflusso nell'Atlantico settentrionale di disgelo provenienti da un lago di origine glaciale, il lago Agassiz, collocato ai margini della calotta Laurentide in fase di ritiro. Questo avrebbe portato a una riduzione significativa o addirittura una interruzione della circolazione termoalina del Nord Atlantico, che rappresenta uno dei punti critici del sistema climatico globale. Infatti, le acque fredde del Nord Atlantico, rese più saline dalla formazione del pack, affondano dando inizio ad un nastro trasportatore che giunge fino al lontano Oceano Pacifico, contribuendo significativamente a ridistribuire il calore del Sistema Terra-Oceano. Una ipotesi del tutto differente, e molto dibattuta, associa invece l'inizio del Dryas recente all'esplosione o all'impatto di uno o più oggetti di origine cosmica al di sopra della calotta Laurentide.

Lo studio degli isotopi stabili ricopre certamente un ruolo fondamentale nella ricerca paleoclimatica, ma esistono anche metodologie di ricostruzione basate su altri approcci. I metodi basati sullo studio di associazioni fossili consentono, sotto certe condizioni, di ottenere ricostruzioni quantitative dei parametri paleoclimatici. L'assunzione fondamentale alla base di queste tecniche è alcune biocenosi sono fortemente controllate dai parametri climatici. Questo può essere certamente affermato per organismi marini come foraminiferi planctonici e radiolari o per la vegetazione, anche se in quest'ultimo caso ci sono problematiche legate alle importanti modifiche operate dall'uomo sulla vegetazione, che potrebbe quindi non essere in equilibrio con le condizioni climatiche. Sulla base di questa assunzione si può cercare di definire una relazione matematica, ossia una funzione di trasferimento, che consenta di associare i parametri climatici alla composizione delle biocenosi.

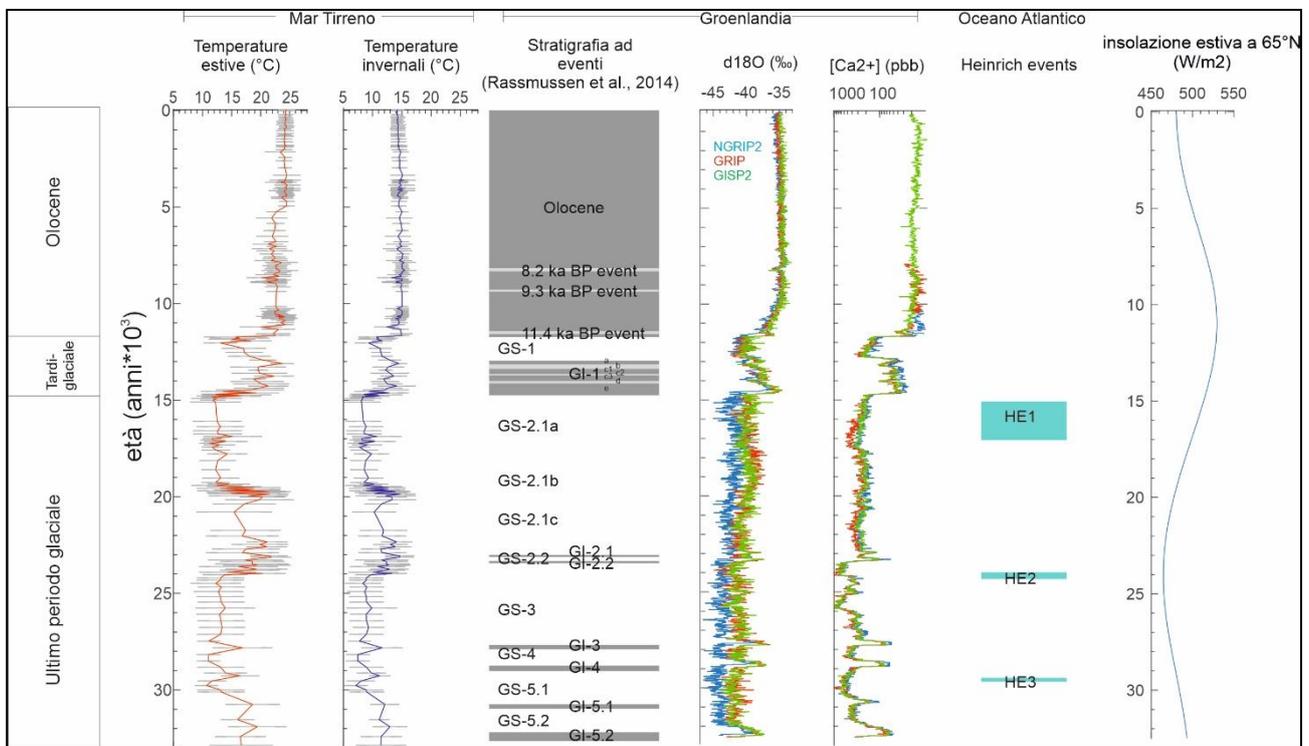


Figura 8. Ricostruzione delle SST estive e invernali del Mar Tirreno ottenute da una Carota recuperata nel Golfo di Salerno. Le barre grigie orizzontali rappresentano l'incertezza associata alla ricostruzione. La ricostruzione è messa in confronto con il record isotopico e geochimico delle carote di Ghiaccio della Groenlandia e i cicli interstadiale-stadiale di Rasmussen et al. (2014), la cronologia degli eventi di Heinrich dell'Oceano Atlantico settentrionale e con i valori della insolazione estiva a 65°N di latitudine (dati estratti da Laskar et al., 2004)

L'applicazione delle funzioni di trasferimento alle associazioni fossili consente quindi di ricostruire quantitativamente i parametri paleoclimatici del passato, tuttavia essa richiede una seconda importante assunzione, ossia che le funzioni di trasferimento definite per il mondo di oggi siano applicabili al passato geologico. Questo assunto è d'altra parte necessario in tutte le ricostruzioni geologiche (e in generale in tutte le scienze storiche) che sempre fanno uso di leggi ricavate dal mondo attuale per interpretare fenomeni non riproducibili. In genere è attraverso l'incrocio di più indizi (*proxies*) che si cerca di verificare il grado di attendibilità di questa assunzione.

Nell'esempio a seguire è illustrata una ricostruzione delle temperature di superficie delle acque (SST) del Mar Tirreno per gli ultimi 30.000 anni ottenuta applicando una funzione di trasferimento alle associazioni a foraminiferi rinvenute in una carota di sedimenti recuperata nel Golfo di Salerno. La ricostruzione evidenzia fluttuazioni delle SST estive che raggiunsero, nelle fasi più fredde del periodo considerato, valori fino a 10°C inferiori a quelli attuali. Un bagno nel Mar Tirreno di 16000 anni fa sarebbe stato equivalente ad un bagno nell'attuale Mare del Nord. La ricostruzione evidenzia anche come il Dryas Recente/GS1 ha impattato anche nel Mediterraneo, determinando una flessione delle SST di circa 7°.

Il dibattito sugli scenari climatici del futuro

Con lo studio del passato geologico abbiamo imparato che se è vero che la *modulazione* delle variazioni climatiche è stata controllata per tutto il Cenozoico (e probabilmente anche prima) dalle variazioni dei parametri orbitali secondo il modello di Milankovitch, il controllo di fondo da un lato, e i bruschi salti di stato dall'altro, sono determinati dalla configurazione del Sistema Terra nel suo complesso. Nel lungo periodo il fattore fondamentale è l'attività delle placche che determina la distribuzione delle terre emerse e degli oceani, la circolazione oceanica e, attraverso i cicli bio-

geochimici, la percentuale di gas serra nell'atmosfera. Nel brevissimo periodo invece, numerosi fattori ed effetti di retroazione (*feedback*) possono fare in modo che, date le stesse condizioni termiche generali, il clima della terra può subire delle variazioni piuttosto brusche. Questa è una manifestazione della *complessità* del sistema, cioè di un sistema controllato da numerosissime variabili che hanno tra di loro dei sistemi di retroazione, talvolta positivi talvolta negativi, che rendono estremamente difficile la modellizzazione.

In particolare, le carote di ghiaccio, oltre alla registrazione isotopica di grande dettaglio, forniscono anche dati diretti sull'atmosfera del passato in quanto consentono di misurare la composizione di minuscole bolle intrappolate in ciascun strato di ghiaccio all'epoca della sua deposizione. Questi dati mostrano (Fig. 8) che variazioni di CO₂ hanno *accompagnato* le variazioni climatiche che sono determinate essenzialmente, come abbiamo visto, dai parametri orbitali. Ma risulta evidente anche che la concentrazione di CO₂ nell'atmosfera è cresciuta molto rapidamente negli ultimi 150 anni, fino a valori molto più alti (più di 400 ppm) che in qualsiasi intervallo dell'ultimo milione di anni. E sappiamo anche che la CO₂ (e ancor più il metano) è anche uno dei forzanti principali del sistema climatico: il progressivo raffreddamento della Terra è stato in parte significativamente determinato dalla sua progressiva diminuzione nell'atmosfera come risultato dell'attività delle placche.

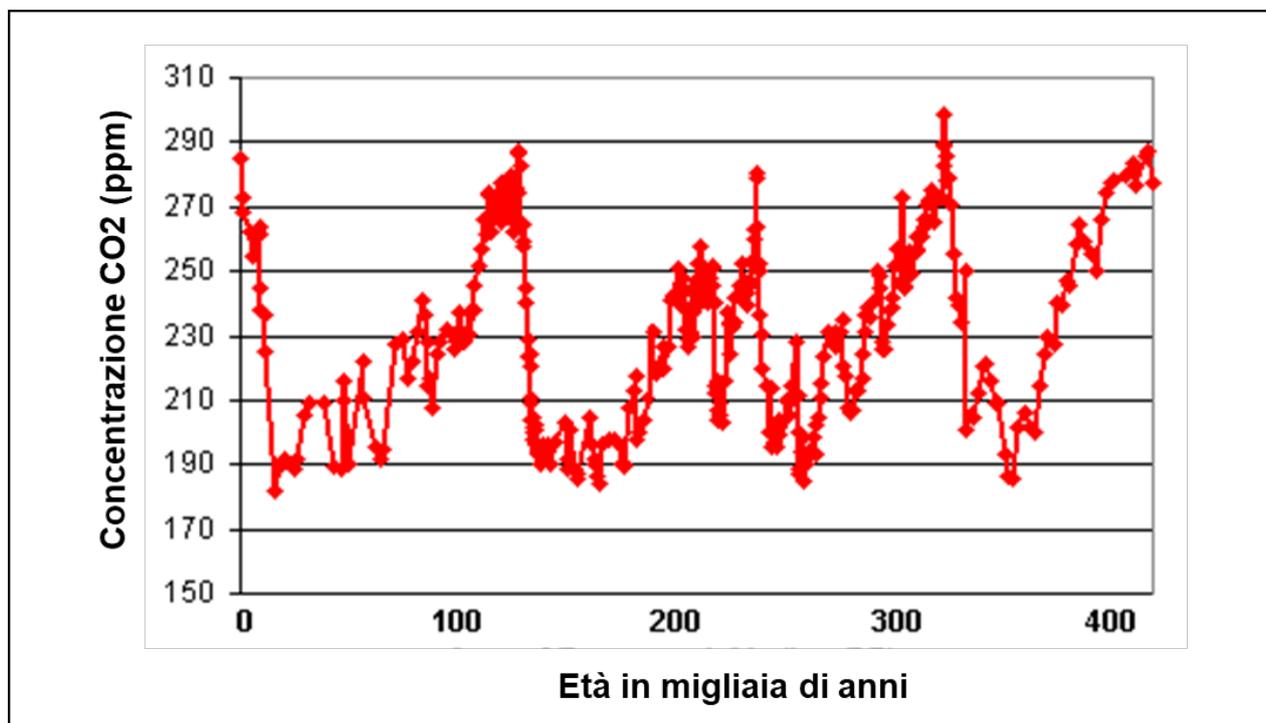


Figura 9. Variazione del contenuto atmosferico di CO₂ nel corso degli ultimi 400.000 anni ricostruita attraverso l'analisi delle bolle d'aria intrappolate nel ghiaccio della Carota Vostok recuperata in Antartide.

Tutte queste informazioni riguardano il passato come ricostruito con metodi geologici. Nel momento in cui si fanno previsioni sugli scenari climatici per i prossimi 50 o 100 anni, la "palla" passa ai climatologi, cioè coloro attingono a questi insegnamenti per delineare modelli matematici previsionali per il prossimo futuro. I numerosi lavori pubblicati da tutta la comunità scientifica sono costantemente passati in rassegna da un *Panel* di scienziati di tutto il mondo incaricato dall'ONU, il IPCC. Attualmente esiste un consenso quasi unanime tra tutti gli scienziati che è in corso un riscaldamento globale e che esso è stato innescato dal brusco aumento di CO₂ connesso alle attività umane a partire dal 1850 circa. Possiamo quindi paragonare l'aumento di CO₂ di origine antropica a

uno di quegli eventi improvvisi che alterano l'equilibrio del sistema e possono portarlo, attraverso meccanismi di feedback positivi, in un nuovo stato.

L'insegnamento per le generazioni in formazione, nella selva di opinioni discordanti che media e social media continuamente diffondono, è quello di rafforzare la propria formazione scientifica e documentarsi andando direttamente alle fonti, ed in particolare alla cospicua documentazione che l'IPCC produce e rende pubblica. Che il sistema sia complesso lo dimostra la storia geologica del Pianeta ma ciò non significa che esso sia incomprensibile e non vada studiato.

Bibliografia

- Emiliani, C. (1955). Pleistocene temperatures. *The Journal of Geology*, 63: 538-578.
- Hays, J. D., Imbrie, J., Shackleton, N. (1976). Variations in the Earth's Orbit: Pacemaker of the Ice Ages. *Science*, 194: 1121-1132.
- Heinrich, M. (1988). Origin and consequence of ice rafting in the northeast Atlantic Ocean during the past 130,000 years. *Quaternary Research*, 29:143-152.
- Laskar, J., Robutel, P., Joutel, F., Gastineau, M., Correia, A.C.M., Levrard, B. (2004). A longterm numerical solution for the insolation quantities of the Earth. *Astronomy and Astrophysics* 428, 261–285.
- Milankovitch M. (1920). *Théorie mathématique des phénomènes thermiques produits par la radiation solaires*. Gauthier-Villars, Parigi, 339 pp.
- Rasmussen S.O., Bigler M., Blockley S.P., Blunier T., Buchardt S.L., Clausen H.B., Cvijanovic I., Dahl-Jensen D., Johnsen S.J., Fischer H., Gkinis V., Guillevic M., Hoek W.Z., Lowe J.J., Pedro J.B., Popp T., Seierstad I.K., Peder Steffensen J., Svensson A.M., Vallelonga P., Vinther B.M., Walker M.J.C., Wheatley J.J., Winstrup M. (2014). A stratigraphic framework for abrupt climatic changes during the Last Glacial period based on three synchronized Greenland ice-core records: refining and extending the INTIMATE event stratigraphy, *Quaternary Science Reviews*, 106, 14-28.
- Shackleton N. (1967). Oxygen Isotope Analyses and Pleistocene Temperatures re-assessed. *Nature*, 215: 15-17.