

IL MUTAMENTO CLIMATICO: FATTI E MITI

Attilio Ferrari

Università di Torino

Accademia delle Scienze di Torino

Raffaele Ferrari

Massachusetts Institute of Technology, USA

L'interpretazione del clima ha acquistato in questi anni un posto di rilievo sia in campo scientifico sia nell'immaginario quotidiano. Il futuro dell'umanità sul pianeta dipenderà in modo considerevole dalla sua capacità di valutare ed eventualmente controllare l'evoluzione dell'ambiente su tempi medi e lunghi: tale evoluzione è il risultato di interazioni fra cambiamenti nello stato della terra solida, negli oceani, e nell'atmosfera. L'analisi globale dello stato del pianeta è il campo di studio della climatologia, una scienza nata appena il secolo scorso e che oggi sta affinando le proprie tecniche osservative, i modelli interpretativi e le capacità predittive secondo la tradizione del metodo scientifico.

Essendo la questione clima così vicina alla nostra vita quotidiana, sovente gli attuali modelli di lavoro dei ricercatori vengono presentati al pubblico come la risposta definitiva alla domanda di quella che sarà la tendenza del clima nei prossimi decenni e secoli. In realtà questi modelli sono basati su informazioni ancora piuttosto limitate sullo stato attuale della biosfera e sulla sua storia negli ultimi milioni di anni e sono ancora ben lontani dall'essere verificati.

Un altro aspetto che va citato prima di affrontare la questione clima è la confusione spesso fatta tra climatologia e meteorologia. La climatologia, come detto, si occupa dell'evoluzione della biosfera su tempi medi e lunghi, tipicamente maggiori delle centinaia o migliaia di anni, e si deve quindi basare su dati raccolti in modo indiretto, nei sedimenti terrestri e marini e nei ghiacci antartici. La meteorologia invece si occupa solo dell'atmosfera e produce i propri modelli basandosi su misure dirette di temperatura, pressione, umidità, venti e su osservazioni satellitari della copertura nuvolosa. Essendo il sistema atmosferico caotico, nel senso che piccole perturbazioni come il battito d'ali di una farfalla, producono variazioni su scala globale nel giro di una settimana, le previsioni dei modelli meteorologiche sono sempre molto incerte e non si possono spingere oltre qualche giorno. Tuttavia è possibile prevedere lo stato medio dell'atmosfera su tempi molto più lunghi di una settimana. Non possiamo prevedere quale sarà la temperatura a Roma il 1 gennaio 3005, ma possiamo affermare con certezza che la temperatura media a Roma nel gennaio 3005 sarà più fredda che nel giugno dello stesso anno. Esiste quindi un intervallo enorme di tempo tra le previsioni meteorologiche e quelle climatologiche: quel che succederà al tempo nei prossimi anni e decenni è per ora del tutto imprevedibile. Ma possiamo sperare di imparare a prevedere i cambiamenti climatici su tempi medi e lunghi.

Questa conferenza sarà dedicata essenzialmente alla presentazione di alcuni degli aspetti della climatologia, in particolare con riferimento all'influenza dei fattori astronomici, che per loro natura agiscono sul clima su tempi lunghi. Inoltre confronteremo l'evoluzione del clima sulla Terra, con quella su altri due pianeti: Venere e di Marte presentano condizioni non lontane da quelle che sulla Terra hanno consentito l'origine alla vita, ma il loro clima appare essersi mosso in direzioni assai differenti e non è oggi favorevole a forme di vita. La climatologia potrà anche darci informazioni sull'origine della vita sulla stessa Terra e su pianeti intorno ad altri Soli. L'elemento fondamentale per la vita in una forma simile alla nostra è l'acqua in forma liquida: è questo che le attuali missioni spaziali nel nostro sistema solare cercano e che un domani cercheremo osservando altre stelle. Va detto che le attuali conoscenze astronomiche indicano che l'acqua sul nostro pianeta non è di

origine endogena, ma è stata portata dai meteoriti che l'hanno bombardato nelle fasi di formazione. Il clima nella sua concezione globale, includendovi i fattori astronomici, è dunque responsabile per la produzione e il mantenimento dell'acqua nella forma liquida e quindi per l'origine della vita. Clima e vita sono strettamente legati sia per la nostra stessa origine, oltre che per il nostro futuro, qui sulla Terra o negli spazi cosmici.

Le origini scientifiche della climatologia

Fino al 1800 il concetto di mutamento climatico fu praticamente assente: la teoria corrente era che la struttura della biosfera terrestre si fosse consolidata dopo le fasi caotiche di formazione del pianeta con una successiva lenta e moderata azione degli agenti atmosferici e geologici. L'unico evento catastrofico sarebbe stato il cosiddetto diluvio universale, ricordato nelle mitologie di molte civiltà. I primi sospetti sulla reale e consistente possibilità di variazioni climatiche vennero dagli studiosi della geologia delle zone montane che cominciarono ad intuire che i ghiacciai modificano incessantemente l'ambiente trasportando con sé massi rocciosi e ghiaie e deformando la geomorfologia attraverso enormi forze di pressione. Il primo rapporto circostanziato venne da Jean-Pierre Perraudin che osservò nel 1815 come le incisioni lasciate sulle rocce nel fondo valle di Bagnes in Svizzera fossero eguali a quelle lasciate recentemente dalla pressione del ghiacciaio in alta quota, indicando come il ghiacciaio dovesse riempire in passato tutta la valle. Perraudin discusse queste osservazioni con il naturalista Jean de Charpentier e l'ingegnere edile Ignace Venetz, che presentarono nel 1829 alla riunione dell'Accademia Svizzera delle Scienze Naturali l'ipotesi che le valli del Giura in un passato non molto lontano fossero state interamente coperte dai ghiacci: ciò era messo in evidenza, oltre che dalle osservazioni di Perraudin, dalla presenza dei cosiddetti massi erratici e dalle strutture moreniche lasciate a valle a seguito della recessione dei ghiacciai. Nel 1834 de Charpentier presentò, sempre all'Accademia Svizzera, la proposta dell'esistenza in passato di una glaciazione globale delle Alpi. La proposta non riscosse grande attenzione da parte dei presenti, ma colpì Louis Agassiz, che, partito per confutarla, perfezionò le osservazioni e ne divenne il più grande sostenitore. Sempre Agassiz formulò nel 1837 la teoria dell'era glaciale e, grazie ad una personalità molto determinata, fu in grado di portarla all'attenzione della comunità scientifica. Basta citare un breve tratto di un suo scritto per comprendere l'effetto che le sue idee ebbero sul pubblico: ... *Lo sviluppo di enormi strati di ghiaccio dovette comportare la distruzione dell'intera vita organica sulla superficie della Terra. Il terreno dell'Europa, precedentemente coperto di vegetazione tropicale e popolato da mandrie di grandi elefanti, enormi ippopotami e carnivori giganti, venne improvvisamente sepolta sotto una grande coltre di ghiaccio che ricoprì pianure, laghi, mari e altipiani* Era infatti noto che la vita fosse apparsa sul nostro pianeta ben prima dell'era glaciale, che risaliva al più ad alcune decine di migliaia di anni fa, e come quindi ne dovesse aver subito gli effetti in modo violento. La biosfera non era stata influenzata dal leggendario diluvio di origine divina, ma da provati fenomeni naturali. A se catastrofi come le ere glaciali erano avvenute nel passato, forse si sarebbero ripetute in futuro, portando a sostanziali mutamenti climatici. Nel giro di una decina di anni la teoria della grande era glaciale venne sposata dal mondo dei geologi come l'unica in grado di spiegare veramente le formazioni moreniche e i massi erratici. Georges Darwin nel suo viaggio sul Beagle (1839) poté confermare la presenza di massi inclusi in grandi ghiacciai dell'emisfero australe. Inoltre il trasporto di materiale da parte di ghiacciai di grande estensione venne verificato anche nel continente nordamericano. L'era glaciale era dunque stata un fenomeno climatico globale. A questo punto la domanda successiva era: quale causa esterna o quale processo climatico aveva determinato la glaciazione dell'Europa, e forse di tutto il globo terrestre?

A tale questione si collegavano gli studi sull'irradiazione solare avviati dalla seconda metà del 1700. Nel 1784 lo scienziato ginevrino Horace-Bénédict de Saussure scriveva: ... *una carrozza, una*

camera, un letto sono maggiormente riscaldati dal Sole quando i raggi passano attraverso a vetri o telai chiusi invece che quando entrano attraverso spazi aperti Si tratta della prima definizione di quello che oggi chiamiamo *effetto serra*, cioè il riconoscimento della capacità degli strati di aria, e quindi in generale dell'atmosfera, di assorbire la radiazione solare e trasformarla, almeno in parte, in calore. De Saussure effettuò quindi le prime misure quantitative sulla potenza della radiazione solare raccolta dall'atmosfera per mezzo di uno strumento che egli denominò *eliotermometro*; si trattava di un recipiente coperto da una o più lastre di vetro separate da spazi di aria e con il fondo annerito e dotato di un termometro che rivelava come l'esposizione al Sole portava ad un aumento di temperatura proporzionale al tempo di esposizione e quindi al calore raccolto. De Saussure misurò che il calore raccolto cresceva con l'altitudine, mostrando che gli strati atmosferici assorbono progressivamente una frazione della radiazione solare.

La formulazione fisico-matematica del fenomeno fu discussa dall'autore della teoria del calore Jean-Baptiste Joseph Fourier, che nel 1827 pubblicò sugli Atti dell'Accademia Reale delle Scienze francese una fondamentale *Memoria sulle temperature del globo terrestre e degli spazi planetari*. L'incipit dell'opera dà una definizione modernissima del problema: *Il problema delle temperature globali è uno dei più importanti e difficile di tutta la filosofia naturale. Si compone di elementi alquanto diversi che debbono essere considerati da un unico punto di vista generale ... La Terra riceve i raggi del Sole, che penetrano la sua massa, e vengono convertiti in calore non luminoso; inoltre possiede un calore interno con il quale è stata creata, e che viene continuamente dissipato attraverso la superficie (... effetto oggi trascurabile); e infine riceve i raggi di luce e calore da innumerevoli stelle, in mezzo alle quali è situato il sistema solare ... Tutti i punti dello spazio cosmico hanno una temperatura comune e costante [la radiazione di fondo cosmica! n.d.A.] ... La Terra avrebbe questa stessa temperatura se non fosse riscaldata dai raggi solari, la cui distribuzione ineguale produce la diversità del clima ... L'interposizione dell'aria modifica molto gli effetti del calore sulla superficie del globo.* Fourier non poté sviluppare calcoli precisi, in quanto ben sapeva come gli mancassero i dati fisici dell'interazione tra aria e radiazione solare sull'intero spettro; ma citò proprio il fatto che altri pianeti possono avere climi diversi per la diversa composizione atmosferica e della superficie. Inoltre specificò che: *... i movimenti dell'aria e delle acque, l'estensione dei mari, l'elevazione e la forma del suolo, gli effetti dell'industria umana e tutti i cambiamenti accidentali della superficie terrestre influenzano le temperature di ogni clima ... la mobilità delle acque e dell'aria tende a moderare gli effetti del calore e del freddo.* Gli attuali modelli climatici seguono esattamente la stessa filosofia di base e, come vedremo, molti dei parametri fisici invocati da Fourier sono tutt'ora incerti e condizionano anche le nostre moderne teorie.

Nel 1842 il matematico francese Joseph Adhémar fu il primo a collegare il verificarsi dell'era glaciale con effetti astronomici che comportano variazioni dell'irradiazione solare, e precisamente quei cambiamenti periodici del moto della Terra intorno al Sole previsti dalla teoria gravitazionale newtoniana. Dopo tutto sappiamo che le variazioni annuali dell'irradiazione solare dovute all'inclinazione dell'asse di rotazione terrestre rispetto all'orbita intorno al Sole determinano il succedersi periodico delle stagioni. Inoltre sappiamo anche che l'asse di rotazione terrestre oscilla con un periodo di 22 mila anni a causa dell'azione gravitazionale combinata di Luna e Sole sulla Terra che non è perfettamente sferica: in tale periodo l'asse di rotazione terrestre che punta verso la Stella Polare, descrive un cono con un angolo di apertura di 23.5° circa. Lo stesso effetto porta ad un'anticipazione delle stagioni e corrisponde alla cosiddetta precessione degli equinozi, già ben nota agli astronomi antichi. Adhémar propose che tale effetto potesse causare variazioni nell'irradiazione dei due emisferi del nostro pianeta. Infatti, nell'emisfero in cui il solstizio di inverno avviene in corrispondenza del perielio, la somma delle ore di luce corrisponde a circa 7 giorni in più della somma delle ore di buio; il contrario avviene per l'altro emisfero: ad esempio nell'attuale configurazione dell'orbita terrestre gli inverni dell'emisfero settentrionale sono più caldi

di quelli dell'emisfero meridionale. Ciò corrisponde ad un'era glaciale nell'emisfero meridionale, dove infatti i ghiacci antartici sono molto estesi; fra 11 mila anni la situazione sarà invertita e quindi l'era glaciale si verificherà nell'emisfero settentrionale. In realtà questa teoria venne confutata da von Humboldt sulla base della considerazione che non sono tanto le ore di luce a determinare il riscaldamento, ma la quantità di radiazione raccolta: inverni più brevi corrispondono a situazioni in cui la Terra è al perielio e quindi più vicina al Sole. Si ricava che bilancio globale comporta in effetti una irradiazione media costante.

Il vero teorico dell'origine astronomica dell'era glaciale fu lo scozzese James Croll che nel 1875 pubblicò un libro dal titolo *Clima e tempo*. Egli introdusse nei propri calcoli sull'irradiazione degli emisferi del pianeta non solo l'effetto della precessione degli equinozi, ma anche quelli legati ai mutamenti dell'orbita terrestre dovuti all'azione gravitazionale dei vari pianeti del sistema solare. Calcoli sviluppati dall'astronomo Leverrier mostravano che l'orbita terrestre non è un'ellisse costante nel tempo, ma cambia periodicamente la sua eccentricità con un periodo di circa 100 mila anni; inoltre l'angolo di apertura del cono di precessione terrestre non è sempre di 23.5° ma varia tra 21° e 25° con un periodo intorno ai 40 mila anni. Questi effetti combinati tra di loro darebbero origine a irradiazioni molto diverse nei due emisferi a intervalli intorno ai 22 mila anni: tuttavia le ere glaciali si verificherebbero con periodo di 22 mila anni solo quando l'eccentricità orbitale è superiore a una certa soglia e anche l'angolo di aperture del cono di precessione è inferiore a una certa soglia. L'ultima sequenza di ere glaciali, alternate ogni 11 mila anni al nord e al sud, sarebbe iniziata 250 mila anni fa e si sarebbe conclusa 80 mila anni fa: da allora saremmo in una fase interglaciale.

La teoria di Croll ebbe grande successo tra i geologi che nel frattempo avevano anche associato come il materiale trasportato dai ghiacciai fosse a strati e indicasse il ripetersi a intervalli del fenomeno di estensione e recessione della coltre di ghiaccio. Croll cercò anche di valutare come le piccole variazioni dei parametri astronomici potessero realmente produrre grandi variazioni climatiche. Per primo introdusse il concetto di reazione climatica positiva: la formazione di ghiaccio iniziata da una diminuzione dell'irradiazione solare ridurrebbe la quantità di vapor acqueo nell'atmosfera e quindi anche l'effetto serra, amplificando di conseguenza l'effetto di raffreddamento. Presto la teoria incontrò serie obiezioni: prima tra queste, la datazione dell'ultima era glaciale circa 10 mila anni fa.

Nel frattempo lo studio del bilancio energetico dell'atmosfera fece passi avanti. Tra il 1859 e il 1961 il fisico irlandese John Tyndall sviluppò la spettrofotometria, una tecnica che gli permise determinare sperimentalmente le capacità di assorbimento della radiazione solare da parte di gas e vapori, uno di quei parametri fisici che Fourier aveva indicato come fondamentale per sviluppare quantitativamente la sua teoria del riscaldamento dell'atmosfera. Tyndall poté dimostrare che le molecole complesse, come vapor acqueo, anidride carbonica, ozono, profumi, ecc. hanno una forte capacità di assorbimento: l'intera capacità di assorbimento dell'atmosfera è determinata dalla loro presenza, sia pure in piccola percentuale. Seguendo la teoria di Fourier si calcola che se non esistesse l'atmosfera la superficie terrestre rimetterebbe parte della radiazione ricevuta come un corpo nero e il bilancio dei flussi radiativi comporterebbe una temperatura di equilibrio intorno ai -18°C . La presenza dell'atmosfera impedisce invece alla superficie terrestre di rimettere direttamente nello spazio. Mentre la radiazione solare penetra su tutta la banda spettrale, soprattutto nella banda elettromagnetica dell'ottico, a cui l'atmosfera è trasparente al 70% (il 30% viene riflesso dalle nuvole e dalle polveri atmosferiche), la radiazione riflessa dalla Terra corrisponde ad uno spettro centrato sull'infrarosso, una banda spettrale che è fortemente assorbita dall'atmosfera: l'atmosfera diventa una coperta che lascia entrare energia, ma non la lascia uscire con la stessa facilità. La temperatura di equilibrio tenendo conto di tale effetto diventa di $+15^\circ\text{C}$, e la differenza di ben 33°C è quel che va sotto il nome di *effetto serra*, perché l'atmosfera agisce in incerto senso

come i vetri di una serra [N.B. **In realta' le serre si riscaldano non per effetto serra, ma perche' la copertura sopprime i moti convettivi e permette al calore emesso dalla terra di riscaldare le piante. Ma questo e' probabilmente un dettaglio non importante per questo articolo**]. Guardando ad altri pianeti, Venere appare avere un'atmosfera ancora più assorbente, con un effetto serra capace di portare la temperatura media a ben +470°C; Marte invece ha un'atmosfera molto tenue, quindi con un debole effetto serra, ed una temperatura media di -53°C.

Queste considerazioni sono raccolte nella memoria *Sull'influenza dell'anidride carbonica atmosferica sulle temperature terrestri*, presentata dal chimico svedese Svante August Arrhenius all'Accademia delle Scienze nel 1895, premio Nobel nel 1903, che completò la sistematizzazione teorica dell'effetto serra combinando la fisica e la chimica. Arrhenius intuì che l'effetto serra è un fattore climatico fondamentale: confrontando Terra, Venere e Marte, è chiaro come un regolato effetto serra sia fondamentale al mantenimento della vita sul nostro pianeta. Inoltre Arrhenius si richiamò al periodo carbonifero come al tempo in cui un riscaldamento atmosferico indotto dalla presenza di grandi quantità di anidride carbonica fece da incubatore per lo sviluppo della vita.

Arrhenius studiò i cicli di trasformazione degli elementi chimici fondamentali che costituiscono la biosfera: carbonio, idrogeno, ossigeno e azoto. Il *ciclo del carbonio* riveste una importanza particolare. Il carbonio è contenuto sotto diverse forme nel mondo organico, animale e vegetale, e in quello inorganico, rocce e oceani. Gli esseri viventi assorbono carbonio attraverso il cibo, in parte lo trattengono, in parte lo restituiscono sotto forma di anidride carbonica attraverso la respirazione. Gli oceani sciolgono l'anidride carbonica, in parte la rievaporano, in parte la fissano nei gusci di organismi marini. Il processo più importante è tuttavia quello che coinvolge la crosta terrestre e la sua dinamica: rocce e minerali si formano per solidificazione del magma vulcanico e di sedimenti lungo tutta la storia geologica della Terra, intrappolando quantità di carbonio assolutamente incomparabili rispetto a quelle contenute negli esseri viventi, negli oceani o nell'atmosfera. Sono quindi i processi di decomposizione o trasformazione della crosta terrestre che possono liberare grandi quantità di anidride carbonica, modificare l'assorbimento atmosferico e quindi determinare mutamenti climatici; in particolare ciò può avvenire anche in episodi eccezionali, quali eruzioni vulcaniche, impatti di meteoriti, rotture della placca continentale, ecc. che possono dare luogo a forti effetti serra. Peraltro Arrhenius non riuscì ad utilizzare i suoi studi sulla chimica e fisica dell'atmosfera per proporre una teoria dell'era glaciale.

Arrhenius con grande lungimiranza prevede che lo sviluppo industriale avrebbe influenzato il clima aumentando progressivamente le percentuali di anidride carbonica nell'atmosfera, e anche in questo aspetto considerò gli aspetti positivi in quanto ... *possiamo sperare di godere di età con un clima migliore e più uniforme, specialmente nelle regioni più fredde del pianeta, età nelle quali la Terra produrrà raccolti molto più abbondanti di oggi per il beneficio di un'umanità in rapido aumento*. E ancora notò che, se nel futuro si approssimerà il rischio di un'era glaciale, come suggerito dagli astronomi, l'umanità potrà controllarne gli effetti innalzando opportunamente la percentuale di anidride carbonica nell'atmosfera.

A combinare geologia, fisica, chimica, astronomia e dinamica della biosfera nello studio del clima fu il geologo statunitense Thomas Chrowder Chamberlin, a cui si deve la prima visione moderna e globale dei problemi climatici. Anzitutto Chamberlin riconobbe la necessità di studiare le ere glaciali non come un fenomeno singolo ma come una sequenza di episodi successivi, in accordo con le ipotesi di una loro origine astronomica. Inoltre fin dal 1896 introdusse il concetto che la spiegazione dei mutamenti del clima è da ricercarsi nell'interazione fra le varie componenti della biosfera e non in spiegazioni limitate ad una singola causa. Chamberlin formulò in modo completo il concetto del ciclo del carbonio come l'agente dei cambiamenti climatici enfatizzando il ruolo dei processi diastrofici che trasformano la crosta terrestre, innalzano ed erodono il suolo, modificano le

correnti oceaniche e atmosferiche. Questi ultimi aspetti della sua ricerca sono moderni e ancora attuali, come vedremo più avanti.

All'inizio del XX secolo erano dunque stati messi in campo tutti gli elementi teorici che oggi compongono la moderna climatologia. Era assodato che nel passato si fossero verificati mutamenti climatici consistenti, la cui origine poteva essere astronomica oppure legata alla dinamica della biosfera e della crosta terrestre, e che simili cambiamenti si sarebbero potuti ripetere in futuro. Quel che mancava erano dati che coprissero differenti ere geologiche in quanto mutamenti climatici significativi avvengono su tempi molto lunghi, superiori alla decina di migliaia di anni. Ciò indicava la difficoltà di ottenere misure dirette: era necessario individuare metodi indiretti per ricavare informazioni sulla temperatura, venti, nuvole e composizione chimica dell'atmosfera, degli oceani e della crosta terrestre. Questo divenne il compito degli studiosi all'apertura del nuovo secolo.

I dati climatici

Le misure climatologiche dirette provengono da registrazioni storiche (per tempi non superiori a un paio di migliaia di anni), dallo studio dei movimenti dei ghiacci attraverso i sedimenti morenici e i massi erratici (di cui già abbiamo parlato) e dall'analisi dell'atmosfera intrappolata nei ghiacciai antichi. Esistono inoltre misure indirette, indicate nella letteratura come *dati proxy*, che provengono dallo studio di sedimenti fossili di organismi microscopici il cui ciclo vitale dipende dalle temperature locali e della composizione del ghiaccio. La valutazione della significatività di questi dati è sempre molto delicata e incerta

Non è qui possibile analizzare in dettaglio tutti i dati paleoclimatici che sono stati individuati e raccolti nell'ultimo secolo. Parleremo dei più importanti, quelli che provengono dai sedimenti oceanici profondi e dai sondaggi verticali (*carotaggi*) degli strati di ghiaccio molto spessi della Groenlandia e dell'Antartide. Nel primo caso si esaminano in strati a varie profondità i resti dei gusci di organismi morti depositati sul fondo come i foraminiferi; tali gusci contengono carbonati di calcio. Nel secondo caso si analizzano direttamente il ghiaccio e le inclusioni di gas e polveri in esso contenute; trattandosi di carotaggi profondi, i gas rappresentano effettivamente l'atmosfera incontaminata intrappolata nel ghiaccio al tempo della sua sedimentazione. In ambedue le misure si analizza la composizione isotopica dell'ossigeno. L'ossigeno in natura si presenta in due forme isotopiche, ^{16}O e ^{18}O (il nucleo del primo è composto da 8 neutroni e 8 protoni, il nucleo del secondo ha 2 neutroni in più). Nelle attuali condizioni dell'atmosfera il rapporto tra atomi di ^{18}O e di ^{16}O è di circa 1/500, ma questo rapporto dipende dai fattori ambientali, ed in particolare dalla temperatura; le variazioni da misurare sono in genere intorno a una parte per milione, ma si tratta di misure fattibili con le tecnologie disponibili oggi. Pertanto l'analisi dei rapporti isotopici dell'ossigeno dei carbonati di calcio contenuto nei gusci dei foraminiferi può dare indicazioni sulla temperatura dell'acqua al tempo della morte dell'organismo. E analogamente il valore del rapporto isotopico nei ghiacci dipende dalla temperatura dell'atmosfera sovrastante la neve al tempo del congelamento. Misure analoghe sono effettuabili anche per il rapporto tra deuterio e idrogeno. Ovviamente occorre un metodo per associare un tempo ai vari strati di sedimenti o di ghiaccio, di cui parleremo fra breve.

La temperatura non è però l'unico fattore a far variare il rapporto isotopico. Ad esempio bisogna tener conto che l'ossigeno che va a comporre i carbonati dei foraminiferi partecipa a processi di evaporazione e precipitazione tra atmosfera e acqua oceanica: gli atomi più leggeri evaporano più facilmente e in fase di glaciazione non riescono a tornare nell'acqua oceanica ma precipitano sui ghiacci; durante le glaciazioni l' ^{16}O diminuisce negli oceani e aumenta nei ghiacci. Molte sono

quindi le variabili ambientali che rendono incerta la valutazione dei dati che vanno considerati con estrema cautela cercando ad esempio di confrontare misure in regioni molto distanti.

I carotaggi nel ghiaccio forniscono inoltre una valutazione diretta delle abbondanze di gas nell'atmosfera che viene intrappolata negli interstizi del ghiaccio nel periodo considerato; in particolare possiamo misurare la percentuali di anidride carbonica e metano nell'atmosfera su tempi geologici. Ciò permette di valutare il livello dell'assorbimento della radiazione solare e dell'effetto serra.

Infine vale la pena citare anche l'analisi dello scheletro dei coralli, anch'esso composto di carbonati di calcio, dei sedimenti organici lacustri e dei pollini fossili in sedimenti terrestri; essi vengono studiati con le stesse tecniche dei sedimenti oceanici profondi. In tal modo si possono valutare gli effetti sul clima locale e gli effetti di cambiamenti climatici sulla comparsa e scomparsa di civiltà antiche. Non vanno poi dimenticate le analisi dei cerchi di accrescimento dei tronchi, che, pur consentendo di risalire nel tempo solo per alcuni secoli, tuttavia permettono una datazione precisa in quanto ogni tronco produce un cerchio di accrescimento all'anno. Questa considerazione ci introduce a discutere la datazione dei vari strati dei sedimenti o dei carotaggi esaminati. Anche per gli strati superficiali dei carotaggi di ghiaccio è possibile avere una datazione contando gli strati: in tal modo si può tornare indietro fino a 40 mila anni, sia pure con incertezze intorno all'1%. Per strati più profondi, che vengono compressi dal peso del materiale sovrastante, si ricorre in genere alla datazione per mezzo di radioisotopi, tipicamente il ^{12}C , il ^{40}K e l' ^{238}U , purché sia presente una quantità sufficiente di detti elementi.

Per i sedimenti marini si è rivelata particolarmente utile la tecnica delle inversioni della polarità magnetica della Terra. Il geofisico Bernard Brunhes scoprì agli inizi del 1900 che i materiali ferromagnetici contenuti nelle lave vulcaniche si orientano nella direzione del campo magnetico terrestre e mantengono l'orientamento all'atto della solidificazione. Trovò in particolare che antiche rocce vulcaniche mostravano un orientamento esattamente opposto a quello corrispondente al campo terrestre odierno. La conseguenza era che nel tempo il campo magnetico terrestre doveva aver invertito la propria polarità. Al momento la proposta di Brunhes fu accolta con scetticismo, ma successivamente i suoi dati vennero confermati dal geofisico giapponese Motonori Matuyama e negli anni 1960 gli statunitensi Allan Cox, Richard Doell e Brent Dalrymple furono in grado di provare che le rocce laviche mostravano questo effetto in simultaneità su tutto il globo. Poiché queste rocce contengono radioisotopi fu possibile quindi datare con ottima precisione l'età dei cambiamenti di polarità magnetica. Alla fine degli anni 1960 Christopher Harrison, Brian Funnell, Neil Opdyke, Nick Shackleton, James Hays e vari collaboratori furono in grado di riconoscere le inversioni di polarità magnetiche nei sedimenti dei carotaggi del fondo dell'Oceano Pacifico e nelle zone antartiche. Inoltre il metodo risultò in perfetto accordo con datazioni basate sui sedimenti di organismi detti radiolari. La scala di tempi per la paleoclimatologia era finalmente pronta.

La teoria astronomica delle ere glaciali

Nella prima metà del 1900 riprese forza la teoria astronomica per l'interpretazione dell'era glaciale (o ere glaciali). Ricordiamo che le conclusioni di Croll avevano trovato serie obiezioni in quanto non parevano in grado di accordarsi con un'era glaciale conclusasi solo 10 mila anni fa. Nel 1924 il matematico serbo Milutin Milankovitch riprese la teoria di Croll con un'importante modifica: invece di collegare le ere glaciali con periodi di inverni molto freddi propose di attribuirle a periodi con estati relativamente fredde, in modo che meno neve si potesse sciogliere di quanta ne veniva prodotta negli inverni: in tal modo i ghiacciai sarebbero progressivamente cresciuti. L'aumento della copertura del ghiaccio avrebbe riflesso più radiazione solare e si sarebbe instaurato un processo a reazione positiva verso un'era glaciale. Sulla base di questa idea Milankovitch riprese i

calcoli sull'irradiazione a varie latitudini terrestri e sulle variazioni periodiche comportate dal moto terrestre intorno al Sole, includendo precessione, cambiamenti dell'eccentricità orbitale e oscillazione dell'asse terrestre. Ricavò il riscaldamento estivo per tre tipiche latitudini settentrionali, 55°, 60° e 65° su un periodo di 650 mila anni nel passato. I suoi dati furono confrontati dal geologo tedesco Wladimir Köppen con la storia dei ghiacciai alpini ottenendo un accordo notevole tra il verificarsi di estati fredde con l'avanzamento dei ghiacciai. La teoria di Milankovitch ottenne grande supporto da Alfred Wegener, l'autore della teoria della deriva dei continenti che rappresentava l'antefatto delle ere glaciali generando la distribuzione delle terre emerse soprattutto nell'emisfero settentrionale, un fattore certamente da tener presente nella climatologia globale.

La teoria di Milankovitch permetteva di superare la discordanza tra la previsione di Croll dell'ultima era glaciale a 80 mila anni fa quando i dati geologici mostravano avanzamenti dei ghiacci fino a circa 10 mila anni fa. Questo fatto è soprattutto evidente nei successivi lavori che giunsero a pubblicazione nel 1941 e che mostrano una sostanziale coincidenza tra la datazione geologica delle ere glaciali e le oscillazioni dell'irradiazione solare estiva. Nella figura XXX sono riportate le curve di Milankovitch per latitudini di 15°, 45° e 75°. L'influenza delle oscillazioni dell'asse di rotazione terrestre, con periodo di 41 mila anni, è soprattutto grande verso i poli, mentre la precessione, con periodo di 22 mila anni, si fa soprattutto sentire vicino all'equatore. Queste serie temporali dell'irradiazione estiva a varie latitudini, combinate con modelli di processi di riflessione ed assorbimento della radiazione solare, permettono di stimare l'altitudine al di sopra della quale si mantiene neve tutto l'anno. Tale linea è oggi solo sulle cime di montagne elevate vicino all'equatore, mentre è al livello del mare ai poli, ma in passato si è innalzata ed abbassata a seconda delle condizioni del moto terrestre intorno al Sole. La maggiore incertezza nella teoria sta proprio in questo aspetto: il legame fisico tra le oscillazioni di irradiazione e il mantenimento di neve perenne non è ben determinato, neppure oggi, e l'ampiezza delle variazioni astronomiche sembra molto piccola rispetto alle grandi variazioni climatiche cui le si vuole associare, pur tenendo conto degli effetti di reazione positiva. Quella di Milankovitch è in realtà un'ipotesi, non una teoria. Milankovitch ha individuato nelle variazioni astronomiche dell'irradiazione solare estiva una possibile causa dei cambiamenti climatici. Ma non ha risolto le complesse equazioni che regolano l'evoluzione del clima sul nostro pianeta per dimostrare il rapporto causa-effetto fra astronomia ed ere glaciali. Tuttavia al di là di queste incertezze le oscillazioni dei parametri astronomici sono ben riconoscibili nei dati geologici e la teoria astronomica sembra l'unica per ora capace di spiegare la paleoclimatologia terrestre. In figura XXX sono riportate le misure di temperatura di sedimenti marini e carotaggi antiartici e l'analisi spettrale del loro segnale. Sembra apparire che prima di 1 milione di anni fa il periodo fondamentale fosse di circa 41 mila anni (oscillazioni dell'asse terrestre), mentre negli ultimi 400 mila anni circa il clima è dominato da un periodo di circa 100 mila anni (eccentricità dell'orbita); il periodo di 22 mila anni della precessione appare invece come una modulazione nei segnali dominati dagli altri due periodi. Perché si abbia questo andamento è del tutto inspiegato ancora, sebbene alcuni modelli nonlineari che combinano effetti astronomici con opportuni processi di reazione positive e negative siano stati proposti, in particolare dallo statunitense John Imbrie nel 1980. Ma questi modelli sono idealizzazioni ben lontane dall'includere i complessi processi che agiscono sul clima terrestre.

Nonostante le proposte di Imbrie e di altri scienziati non è ancora chiaro quanto grande sia l'effetto astronomico sul clima: secondo alcuni climatologi esso è troppo piccolo per avere rilevanza sul clima. Recentemente un forte sostegno alle interpretazioni astronomiche è venuto dalle osservazioni dei ghiacci marziani. Le missioni orbitanti intorno a Marte (Surveyor, Orbiter, Mars Express) hanno permesso di ricavare mappe dettagliate del terreno mettendo in evidenza i terrazzamenti morenici su vari strati prodotti dall'estendersi e ritirarsi delle calotte polari. È così stato possibile ricavare una scala temporale delle ere glaciali marziane (attualmente Marte si trova in una tale era) e metterle in relazione con i fattori astronomici del suo moto intorno al Sole. L'orbita di Marte ha variazioni di

eccentricità più grandi di quelle terrestri, e inoltre non è stabilizzata dalla presenza di una luna di grosse dimensioni. Ciò comporta che il suo asse di rotazione abbia oscillazioni molto più grandi, tra 14° e 48°. Nel complesso quindi il suo clima subisce variazioni molto più consistenti, e questa è molto probabilmente una delle ragioni che hanno impedito lo sviluppo della vita verso organismi complessi (anche se non possiamo escludere che organismi elementari possano essere trovati in futuro nel permafrost sotterraneo). I calcoli mostrano che le previsioni astronomiche sono in ottimo accordo con i movimenti dei ghiacci. Il dato è tanto più significativo in quanto, come già detto, l'effetto serra su Marte è sicuramente molto debole per la tenuità dell'atmosfera. Che cos'altro potrebbe dunque aver cambiato il clima di Marte se non le sue pazze evoluzioni orbitali ?

Il global warming

Ancora oggi non siamo in grado di rispondere alla domanda se il clima della Terra possa essere effettivamente dominato dagli effetti astronomici. La ragione è che secondo una corrente di pensiero della climatologia la dinamica della biosfera e la sua composizione chimica sembra prendere il sopravvento su ogni altro effetto endogeno ed esterno. La figura XXX riporta l'andamento schematico del clima negli ultimi 65 milioni di anni, dal Paleocene ad oggi. Il Paleocene segna l'affermarsi dei mammiferi su tutte le altre specie. Precedentemente i dinosauri erano stati una forma dominante, ma intorno ai 65 milioni di anni il combinarsi di un periodo molto secco con un evento catastrofico (forse l'impatto di un gigantesco meteorite) determinarono l'estinzione di una specie che richiedeva enormi quantità di cibo. I mammiferi furono salvati proprio dalle loro dimensioni ridotte e quindi alla possibilità di trovare facilmente riparo e cibo sufficiente. In questi periodi, fino all'Oligocene, la temperatura globale della Terra era relativamente elevata, sia per effetti endogeni, sia per effetto serra a causa della notevole attività vulcanica capace di tenere alti il livello di anidride carbonica, vapor acqueo e polveri nell'atmosfera.

In quel periodo la distribuzione dei continenti non aveva ancora raggiunto la sua attuale configurazione, ma era più uniforme tra emisfero nord e sud. Le correnti oceaniche avevano in ambedue gli emisferi la possibilità di mantenere un collegamento tra regioni polari ed equatoriali impedendo la formazione delle calotte polari. Nel Miocene il continente antartico iniziò un moto di deriva verso il polo sud; Shackleton mostrò con studi sui sedimenti oceanici che le calotte glaciali iniziarono a formarsi intorno a 13 milioni di anni fa. Altri ghiacciai si formarono sulle montagne dell'Alaska. Intorno a 6 milioni di anni fa l'Australia e l'America meridionale si mossero verso l'equatore permettendo lo stabilirsi di un sistema di correnti circumpolare che isolò l'Antartide dalle zone calde del pianeta e condannandola ad una copertura permanente di ghiacci fino ai giorni nostri. Similmente la disposizione dei continenti nell'emisfero nord isolò l'Oceano Artico rendendolo estremamente sensibile alle variazioni di irradiazione solare. È possibile che sia a questo punto che diventa importanti i fattori astronomici che portano alla successione di ere glaciali.

Durante le prime ere glaciali lo sviluppo della civiltà è estremamente limitato, confinato alle relativamente brevi fasi interglaciali. I mammiferi tuttavia sopravvivono nelle zone più temperate intorno all'equatore. I resti paleontologici dell'Africa orientale indicano la presenza umana circa 3 milioni e mezzo di anni fa. In tali regioni la vita è difficile non tanto per la temperatura quanto per la siccità. Possiamo dire che proprio le difficoltà ambientali selezionano una particolare specie di mammiferi in grado di affinare le capacità manuali necessarie a non cedere alle difficoltà del clima e alla scarsità di cibo. Dopo le varie glaciazioni, circa 10 mila anni fa, al termine della più recente glaciazione, l'Homo Sapiens è pronto per lanciarsi in un rapido sviluppo. Nascono le civiltà nelle regioni più temperate. Ma ora, grazie alla tecnologia, può anche sopravvivere in regioni inospitali.

Ogni inizio di periodo interglaciale è accompagnato da un rapido aumento delle concentrazioni di anidride carbonica e metano nell'atmosfera, proprio perché il bilancio del ciclo del carbonio permette a questi gas di evaporare dagli oceani in modo più cospicuo di quanto non si verifichi quando l'acqua è ghiacciata. Questo dato è ben confermato dai carotaggi antartici e della Groenlandia. L'andamento della crescita dei parametri climatologici della presente fase interglaciale sono sostanzialmente eguali a quella verificatasi 400 mila anni fa. Almeno fino ad ora. Secondo i dati più recenti tuttavia sembra che la crescita di temperatura e concentrazione di anidride carbonica siano seguendo una tendenza di crescita esponenziale, apparentemente assente nelle precedenti ere interglaciali. Va detto che il confronto è ancora difficile. Ma molti climatologi hanno puntato l'attenzione su questo fatto come risultato dello sviluppo industriale che sta certamente modificando il bilancio del ciclo del carbonio.

Il pianeta Venere viene spesso citato come il risultato di un effetto serra estremo. L'elevata concentrazione di anidride carbonica nella sua atmosfera (96%) produce un rialzo di temperatura a 420°C, un vero inferno. Per ora la Terra è ancora a concentrazioni dell'ordine dello 0.03%. L'effetto serra è quel che ha permesso all'uomo di procurarsi condizioni di vita accettabili. Tuttavia in futuro potrebbe condannarla a situazioni progressivamente più simili al caso di Venere. È questo l'allarme lanciato da vari comitati internazionali, in particolare dall'Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Sono state presentate negli anni recenti varie simulazioni numeriche dell'evoluzione del clima, basate su quanto oggi sappiamo o crediamo di sapere. Aumenti di temperatura media superiori ai 2°C potrebbero verificarsi entro il 2100 (figura XXX). Le conseguenze sarebbero lo scioglimento dei ghiacci, anche in Antartide, l'innalzarsi del livello del mare, condizioni climatiche sempre più torride, piogge continue. Certo una prospettiva non troppo piacevole. D'altra parte negli ultimi 10 mila anni si sono susseguiti per effetti naturali periodi più caldi e più freddi degli stessi valori, senza risultanze troppo traumatiche per l'umanità. Anche se il catastrofismo sembra spesso di moda, forse sarebbe bene per ora prendere sul serio questi risultati senza peraltro dimenticare che poco ancora sappiamo dell'intreccio di fattori dinamici dell'intera biosfera. In sintesi: se prevarranno gli effetti astronomici potremmo andare verso un'altra era glaciale; se effettivamente l'attività umana avrà i risultati delle previsioni dell'IPCC, l'effetto serra ci spingerà verso il cosiddetto riscaldamento globale, il *global warming*. Oggi sappiamo ancora troppo poco sui processi fisici, chimici, dinamici della biosfera per scegliere una delle soluzioni. Magari si compenseranno, o starà a noi fare in modo che si compensino. Mentre finora l'uomo ha subito il clima difendendosene, domani potremo controllare il clima. Se avremo pazienza, tempo e capacità di investire verso ricerche serie, non preconette.