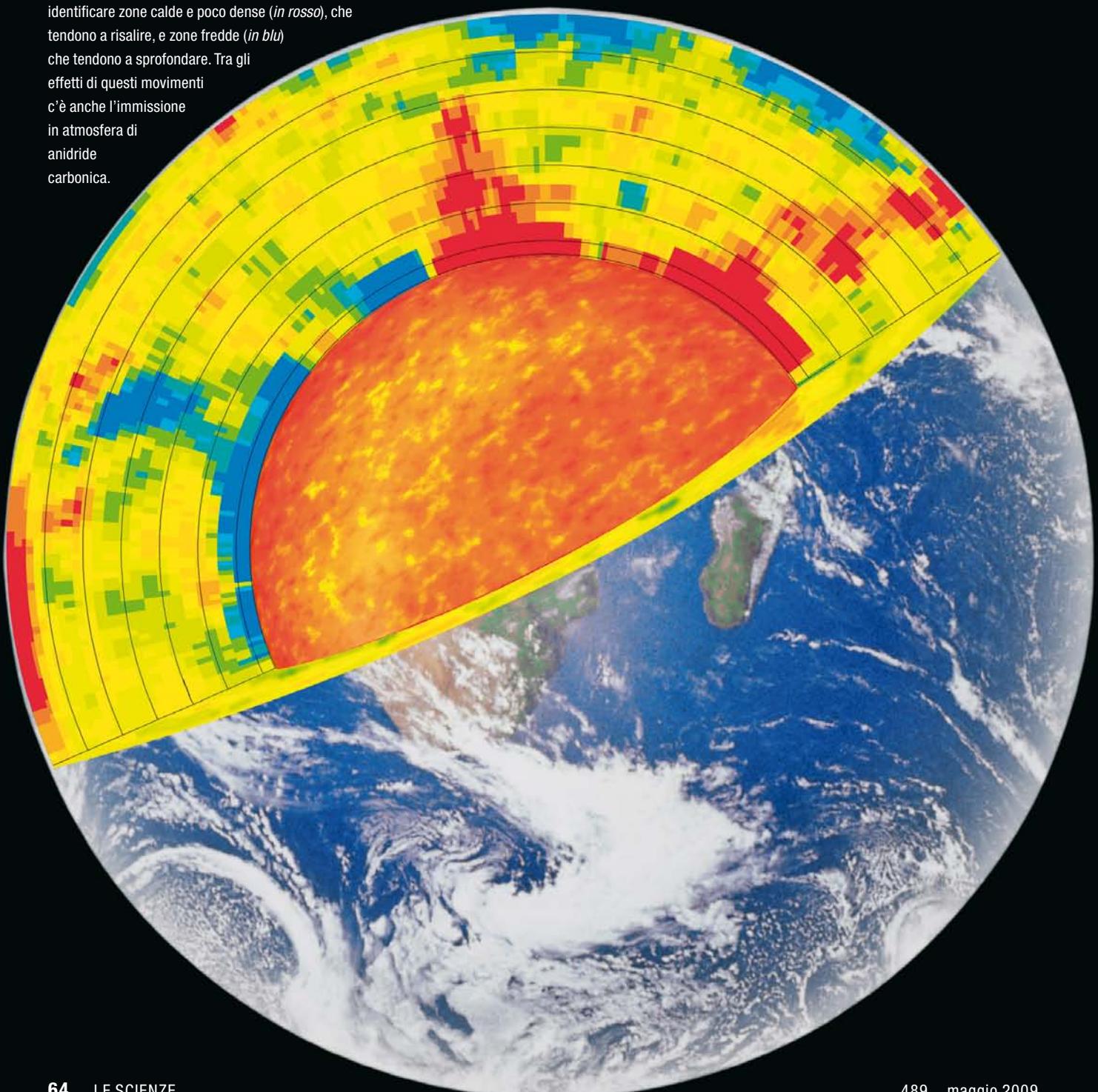


# Il clima che viene dal basso

di Enrico Bonatti

**ANATOMIA DELLA TERRA.** La velocità con cui viaggiano nel mantello (in giallo) le onde sismiche generate dai grossi terremoti permette di identificare zone calde e poco dense (in rosso), che tendono a risalire, e zone fredde (in blu) che tendono a sprofondare. Tra gli effetti di questi movimenti c'è anche l'immissione in atmosfera di anidride carbonica.



**I cambiamenti climatici sono causati non solo dall'energia ricevuta dal Sole, o da attività umane come l'uso di combustibili fossili, ma anche da fattori interni alla Terra, come è già accaduto nel remoto passato**

**Q**uando pensiamo al clima del nostro pianeta e alle sue variazioni giornaliere o stagionali tendiamo a guardare verso il cielo. Temperatura, pressione, umidità dell'aria, vento, precipitazioni: il tutto legato alla quantità di calore che arriva dal Sole. Se consideriamo però una dimensione temporale più lunga (dell'ordine di milioni di anni), uno dei fattori principali di regolazione del clima dobbiamo cercarlo centinaia di chilometri sotto i nostri piedi. La composizione dell'atmosfera, per esempio, il suo contenuto di gas serra quali anidride carbonica ( $\text{CO}_2$ ), metano ( $\text{CH}_4$ ) e acqua ( $\text{H}_2\text{O}$ ), che nei tempi lunghi influenza fortemente il clima, è variata soprattutto a causa di processi che avvengono all'interno della Terra e che determinano anche il movimento dei continenti, l'innalzamento delle grandi catene montuose, il vulcanismo e i terremoti.

Per entrare più a fondo nel legame tra processi interni alla Terra e mutamenti del clima, vediamo prima quali sono questi processi e poi come hanno regolato il clima terrestre, provocando anche episodi sia di freddo estremo sia di caldo intenso.

## Storia dell'atmosfera terrestre

Oggi l'atmosfera della Terra è composta principalmente da azoto, 79 per cento circa, e ossigeno, 21 per cento, più alcuni componenti minori come anidride carbonica, che al momento ha una concentrazione di 380 parti per milione, metano, 1,7 parti per milione, e vapore acqueo. Il fatto che la presenza in atmosfera di  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  e  $\text{H}_2\text{O}$  tenda a riscaldare il pianeta è argomento di attualità, oggetto di vivaci dibattiti tra politici e scienziati. L'«effetto serra», teorizzato dal fisico francese Jean Baptiste Joseph Fourier già nel 1827, e poi dal chimico svedese Svante Arrhenius nel 1896, si basa sul fatto che la radiazione solare in arrivo sul-

la Terra viene in parte irradiata di nuovo verso lo spazio sotto forma di radiazione infrarossa, cioè calore. Le molecole di  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  e  $\text{H}_2\text{O}$  in atmosfera intercettano però i raggi infrarossi e trattengono sulla Terra il calore corrispondente. Più alta è la concentrazione di queste molecole, maggiore sarà la quantità di calore trattenuta, più intenso sarà il riscaldamento della superficie terrestre.

Se la Terra fosse priva di atmosfera, quindi senza l'effetto serra, la temperatura media alla superficie sarebbe di circa -25 gradi Celsius. E sarebbe stata ancora più bassa nel lontano passato, perché la quantità di calore che oggi il Sole irradia è circa il 30 per cento maggiore rispetto a quella irradiata 4,5 miliardi di anni fa, subito dopo la formazione della Terra. A quelle temperature sarebbe stato difficile avere acqua liquida sulla superficie della Terra e, dunque, la vita sarebbe stata molto improbabile. In questo ipotetico scenario la Terra sarebbe simile a Marte, la cui temperatura media superficiale (circa -60 gradi) è bassa non tanto perché Marte è più lontano dal Sole rispetto alla Terra, ma perché l'atmosfera marziana, 100 volte più diluita di quella terrestre e con un effetto serra trascurabile, non riesce a trattenere il calore.

All'altro estremo abbiamo Venere, che con un'atmosfera composta principalmente da  $\text{CO}_2$  e circa 100 volte più densa rispetto a quella della Terra, è un pianeta soggetto a un enorme effetto serra, e di conseguenza ha una temperatura media in superficie di circa 450 gradi. Insomma l'effetto serra, giustamente temuto come serio pericolo per il nostro futuro, non è di per sé malvagio. Anzi, se non fosse per l'effetto serra sul nostro pianeta la vita non si sarebbe sviluppata.

Da dove viene l'atmosfera terrestre? Andiamo indietro nel tempo fino a 4,5 miliardi di anni fa, quando piccoli corpi rocciosi, i cosiddetti pla-

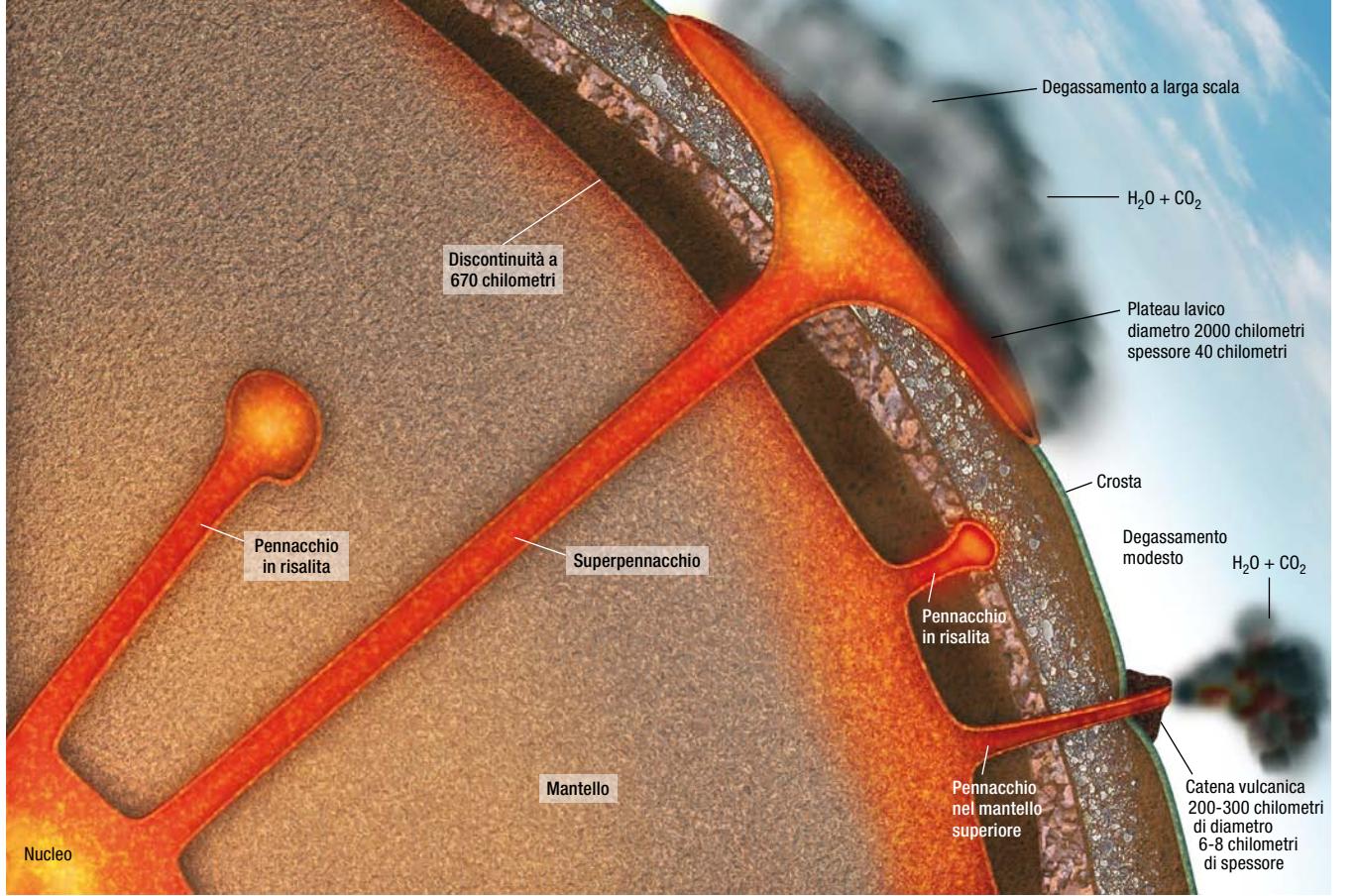
## IN SINTESI

- Variazioni nel flusso di energia solare e consumo di combustibili fossili non sono gli unici fattori che modificano il clima. Anche fattori interni al pianeta causano cambiamenti climatici, come è avvenuto nel remoto passato.

- Tra i processi che avvengono sulla Terra e che hanno modificato il clima, ci sono il vulcanismo, la deriva dei continenti, la formazione di catene montuose ed eventi straordinari come la risalita di masse eccezionalmente calde dalle profondità del mantello.

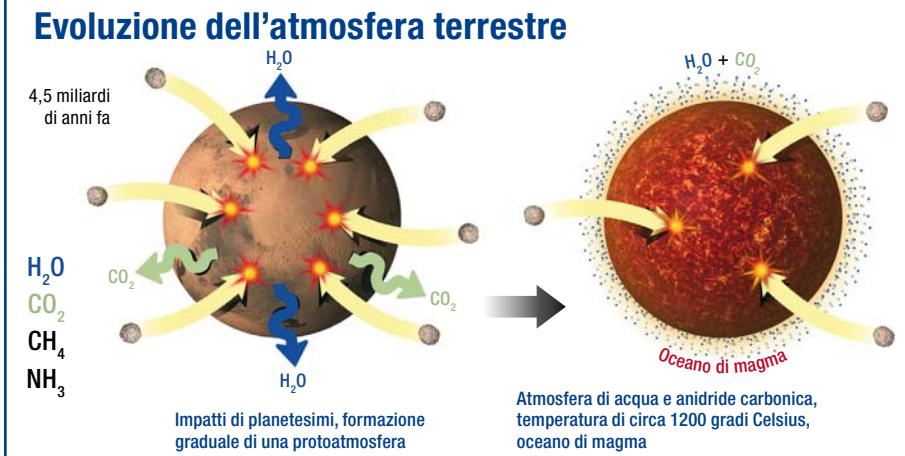
- Non sappiamo per quanto tempo ancora le dinamiche del pianeta influenzano il clima in una scala temporale di decine o centinaia di milioni di anni.

Steve Grand, Università del Texas/SPU/Grazia Neri



netesimi, si condensavano dalla nebulosa solare, aggregandosi a formare i nuclei dei pianeti. Possiamo ricostruire la composizione dei planetesimi studiando le meteoriti, molte delle quali sono probabilmente relitti di antichi planetesimi. Le condriti carbonacee, una classe di meteoriti, possono contenere fino al 7-8 per cento di acqua e composti del carbonio, che all'impatto dei planetesimi si sono volatilizzati, generando la prima atmosfera della Terra. I gas prevalenti nella nebulosa originaria, cioè idrogeno ed elio, erano troppo «leggieri» per essere trattenuti dal campo gravitazionale del proto-pianeta. L'unica eccezione ha riguardato le molecole di idrogeno che si sono legate all'ossigeno per formare acqua.

Conoscendo massa e composizione dei planetesimi (inclusi le comete, composte principalmente di ghiaccio) si può ipotizzare un'atmosfera iniziale estremamente densa, composta da acqua, anidride carbonica, metano e ammoniaca, ma priva di ossigeno, con una pressione in superficie vicina a 100 atmosfere (cioè la pressione che troviamo oggi 1000 metri sotto la superficie del mare). Un'atmosfera di questo tipo ha generato un enorme effetto serra. Il calore veniva prodotto da impatti di planetesimi (si veda il box al centro della pagina) e dal decadimento di elementi radioattivi presenti nella Terra solida (calore di un ordine di grandezza superiore rispetto a quello prodotto dai sistemi radioattivi attuali) oltre che dalla radiazione solare. Si calcola che la temperatura in superficie della pro-



**PIANETA DINAMICO.** Materia con composizione e temperatura tali da causare densità più basse del normale può risalire nel mantello nei cosiddetti pennacchi (*plume* in inglese), e causare un vulcanismo molto intenso in superficie, con rilascio di acqua e anidride carbonica, entrambi gas serra. Vi sono studiosi che ipotizzano come alcuni superpennacchi possano derivare addirittura dalla regione del mantello appena al di sopra del nucleo.

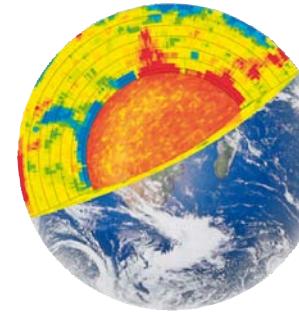
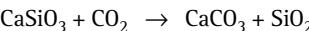
to-Terra raggiunse 1200 gradi, causando la parziale fusione dello strato esterno silicatico e la formazione di un «oceano di magma» profondo decine, forse centinaia di chilometri. La diminuzione nella frequenza degli impatti e l'indebolimento dei sistemi radioattivi ha portato all'abbassamento della temperatura superficiale della giovane Terra e alla condensazione del vapore acqueo che, a causa dell'elevata pressione atmosferica, avveniva a più di 100 gradi. Un primo «diluvio universale» ha formato i primi oceani, lasciando un'atmosfera ricca di anidride carbonica, (simile a quella attuale di Venere), con un forte effetto serra e temperature superficiali elevate rispetto a quelle odiere.

Illustrazioni: Stefano Carrara (su indicazione dell'autore)

## Processi fondamentali e attuali

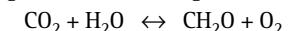
L'emersione dei primi continenti dall'oceano primordiale ha portato a una graduale riduzione della CO<sub>2</sub> in atmosfera. A sua volta questa diminuzione ha innescato un meccanismo che ha regolato il clima del nostro pianeta fino a oggi, basandosi sull'interazione di due processi: immissione di anidride carbonica e metano negli oceani o direttamente in atmosfera dal basso, cioè dal mantello terrestre; estrazione di CO<sub>2</sub> dall'atmosfera per alterazione delle rocce continentali e formazione di carbonati. La prevalenza del secondo meccanismo in certe fasi della storia della Terra ha portato al raffreddamento del clima, mentre la prevalenza del primo ha prodotto periodi di clima caldo.

Il secondo meccanismo si basa sull'alterazione chimica di rocce continentali causata da piogge che contengono CO<sub>2</sub>: elementi come calcio (Ca) e magnesio (Mg) vengono estratti da rocce silicate, formate cioè anche da silicio (Si) e ossigeno (O), e trasportati in soluzione nell'oceano. Una serie di reazioni riassunte come la seguente



sata dall'estrazione di anidride carbonica rallenta l'alterazione delle rocce e quindi anche l'estrazione di CO<sub>2</sub>, perché l'alterazione delle rocce dipende fortemente dalla temperatura. Di conseguenza la temperatura aumenta, favorendo l'alterazione delle rocce e l'estrazione di CO<sub>2</sub> dall'atmosfera, che porta di nuovo alla diminuzione della temperatura e così via. Nella storia della Terra, questo ciclo ha permesso la variazione del clima entro limiti abbastanza ristretti, a parte alcuni eventi eccezionali.

Nelle ultime centinaia di milioni di anni, quando la vita si è sviluppata rigogliosamente, un terzo meccanismo è diventato importante: lo scambio di CO<sub>2</sub> tra organismi, materia organica e atmosfera:

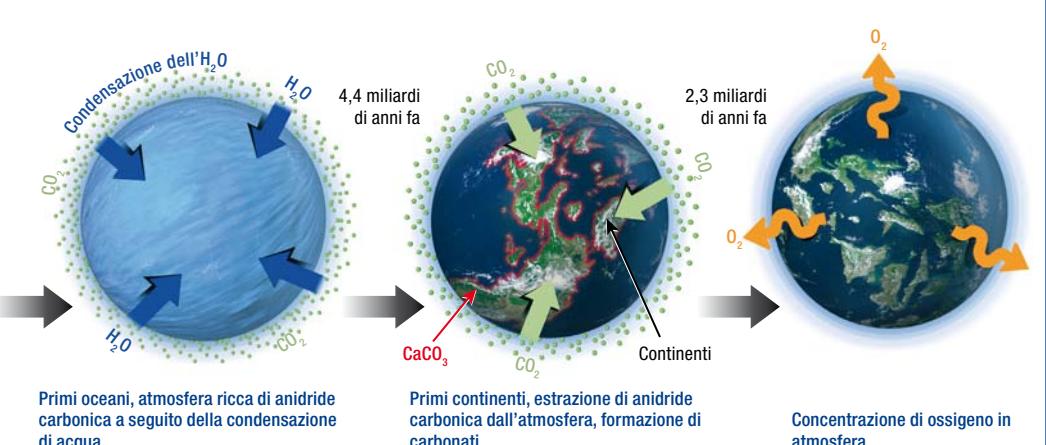


Da sinistra a destra questa reazione rappresenta la produzione di ossigeno legata alla fotosintesi, processo iniziato oltre tre miliardi di anni fa grazie all'attività dei cianobatteri. Da destra a sinistra la reazione simboleggia sia l'ossidazione di sostanze organiche sia il processo di respirazione. Ma rappresenta anche il processo innescato dall'umanità nell'ultimo centinaio di anni: l'immissione di CO<sub>2</sub> in atmosfera dovuta all'uso di combustibili fossili, ovvero di materia organica accumulata in milioni di anni.

## Dal mantello all'atmosfera

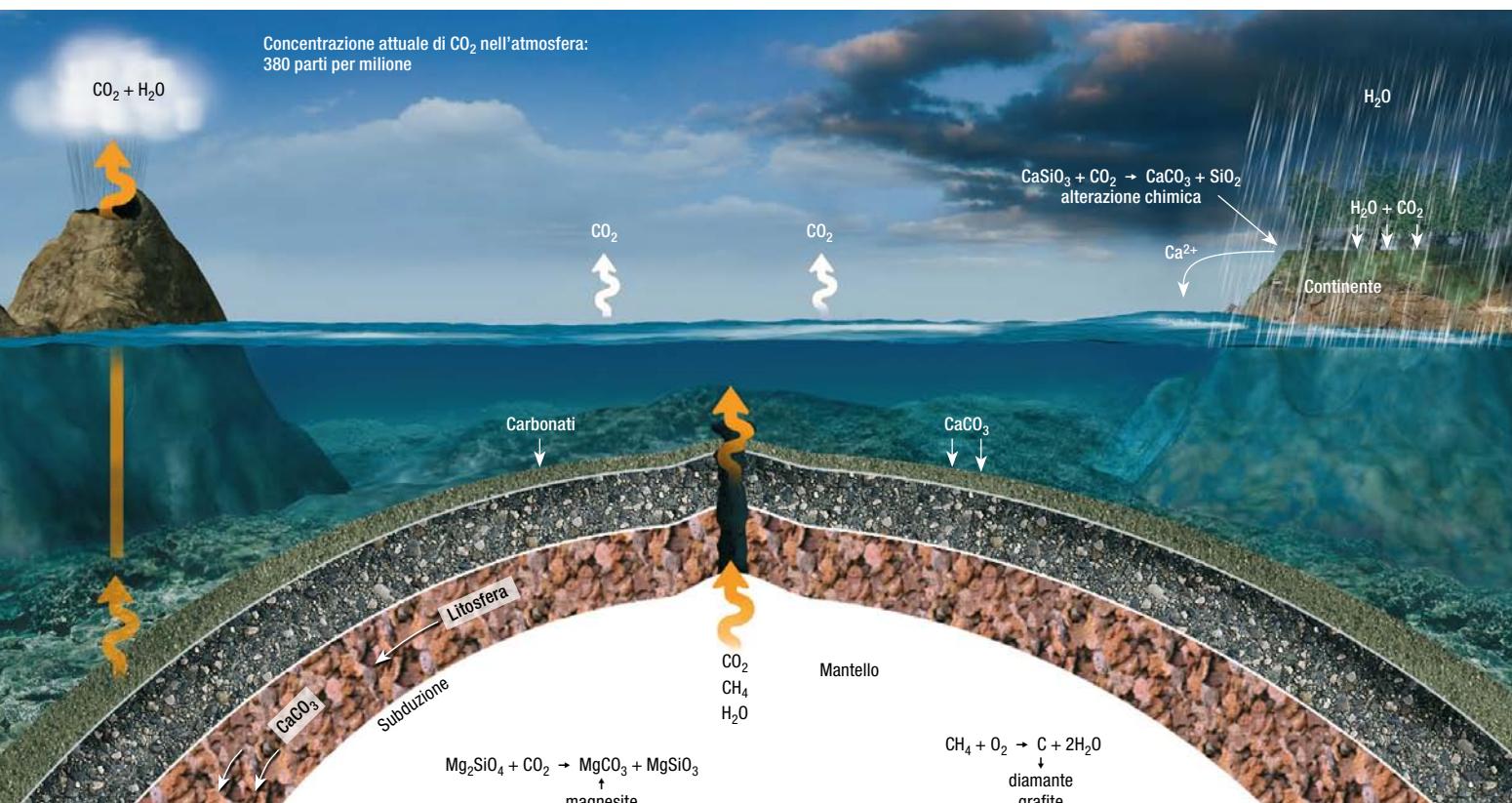
Vediamo ora in che forma il carbonio è presente nelle profondità del mantello terrestre, e il modo in cui è estratto e immesso in atmosfera.

Il mantello, regione dell'interno della Terra che si estende fino al limite con il nucleo metallico, cioè fino a 2900 chilometri di profondità, ha una composi-



zione silicatica ereditata dai planetesimi. Tra gli elementi che costituivano la nebulosa da cui hanno avuto origine i pianeti, il carbonio (C) era quarto in ordine di abbondanza. Del resto questo elemento è relativamente abbondante anche fuori dal sistema solare. Per esempio ci sono stelle il cui involucro esterno è costituito principalmente da carbonio, prodotto dall'elio per fusione nucleare. Particelle extrasolari di grafite, diamante e carburo di silicio, tutte contenenti carbonio, sono state portate sulla Terra da meteoriti.

Il mantello terrestre contiene in media parecchie centinaia di parti per milione di carbonio. Nel suo insieme contiene 100 volte più carbonio rispetto a quello presente nella biosfera e nell'atmosfera mes-



#### CICLO REGOLATORE.

La concentrazione di  $\text{CO}_2$  in atmosfera è regolata anche dai due processi descritti nella figura qui sopra. Nel primo si ha l'immissione di  $\text{CO}_2$  e metano dal mantello negli oceani e in atmosfera, grazie a fluidi idrotermali sui fondali e vulcani. Il secondo estrae  $\text{CO}_2$  dall'atmosfera, alterando rocce continentali con piogge ricche di anidride carbonica. I prodotti

dell'alterazione, in particolare calcio e magnesio, trasportati in mare dai fiumi, portano alla formazione di carbonati ( $\text{CaCO}_3$ ), grazie soprattutto a organismi marini che li sintetizzano per il loro guscio. Alla morte dell'organismo il guscio calcareo si deposita sul fondo. Lungo le zone di subduzione ai margini degli oceani, i carbonati sono trasportati nel mantello: in parte sono disciolti producendo di nuovo  $\text{CO}_2$ , espulsa dal vulcanismo d'arco, in parte penetrano in profondità fino alle alte pressioni dove sono stabili la magnesite e i diamanti.

Se nel lontano passato il mantello era meno ossidato rispetto a oggi, come ipotizzato da alcuni studiosi, allora il metano era la specie volatile di carbonio prevalente in quella porzione del pianeta. L'assenza di ossigeno ha permesso al metano di raggiungere concentrazioni significative in atmosfera fino a 2,3 miliardi di anni fa, contribuendo

all'effetto serra. Tra l'altro già da oltre due miliardi di anni erano attivi microrganismi metanogeni, che consumando idrogeno ( $\text{H}_2$ ) e anidride carbonica producevano metano.

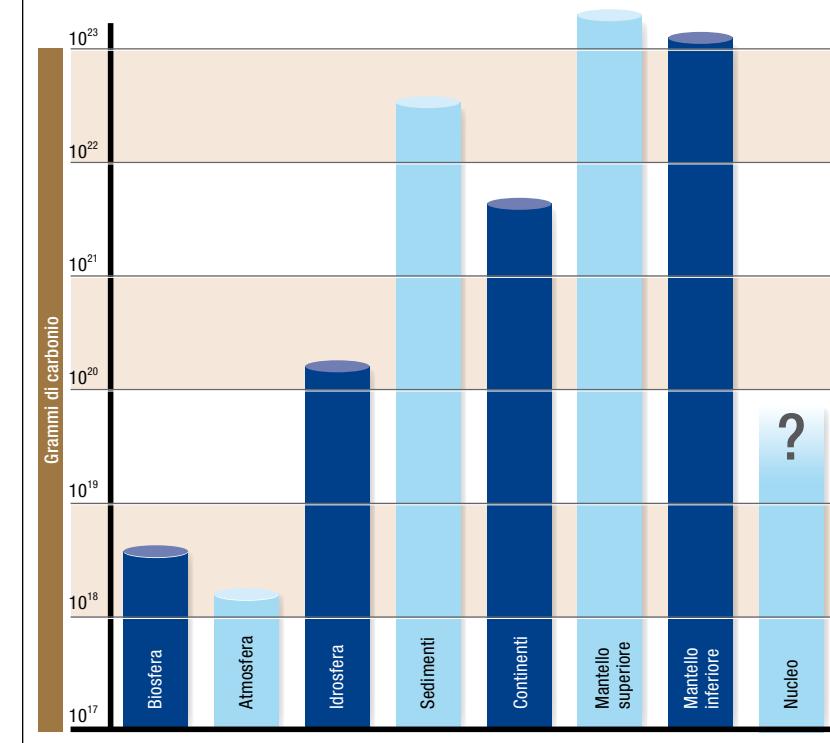
L'immissione in atmosfera di idrogeno e metano dovuta a fenomeni vulcanici può aver impedito all'ossigeno di accumularsi in atmosfera prima di 2,3 miliardi di anni fa, sebbene l'ossigeno fosse prodotto dai cianobatteri già da oltre due miliardi di anni. L'ossigeno sarebbe stato consumato dall'ossidazione di  $\text{CH}_4$  e  $\text{H}_2$  immessi in atmosfera dal mantello, fino a quando la graduale ossidazione proprio del mantello ha poi portato alla prevalenza di  $\text{H}_2\text{O}$  e  $\text{CO}_2$  tra i gas vulcanici, permettendo l'accumulo di ossigeno in atmosfera e, di conseguenza, un salto nell'evoluzione biologica. Oggi il metano è quasi scomparso dall'atmosfera (la sua concentrazione è inferiore a due parti per milione) e i batteri metanogeni si sono rifugiati in nicchie ecologiche particolari, dove l'ossigeno è assente (per esempio nell'intestino dei bovini).

Forse non è una coincidenza il fatto che 2,3 miliardi di anni fa, proprio mentre l'ossigeno cominciava ad accumularsi in atmosfera, si è verificata una prima grande glaciazione: la glaciazione huroniana. È probabile che una delle cause sia stata proprio l'eliminazione del metano dall'atmosfera per opera dell'ossigeno.

Illustrazione: Stefano Carrara (su indicazione dell'autore)

Illustrazione: Stefano Carrara (su indicazione dell'autore)  
in «Nature», Vol. 300, pp. 171-173, 11 novembre 1982

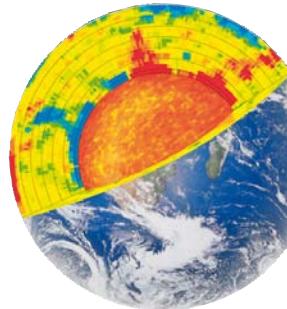
## Serbatoi terrestri di carbonio



#### Il ruolo della deriva dei continenti

Studi di paleomagnetismo suggeriscono che più volte nel corso dei due ultimi miliardi di anni le masse continentali si sono radunate in un unico supercontinente, per poi disperdersi di nuovo, in cicli di circa 400-500 milioni di anni che hanno avuto forti ripercussioni sul clima. Prendiamo come esempio la frammentazione del supercontinente Rodinia, avvenuta nel Proterozoico, tra 750 e 700 milioni di anni fa. Già negli anni settanta il geologo W. Brian Harland dell'Università di Cambridge aveva dedotto dallo studio di rocce continentali di età proterozoica in varie località (Namibia, Australia, Cina) che questi blocchi continentali erano caratterizzati da depositi glaciali, anche se in origine si trovavano a basse latitudini e non molto elevati sul livello del mare (si veda la mappa a p. 70). Studi più recenti hanno confermato queste osservazioni.

Come spiegare una Terra coperta dai ghiacci fino ai tropici? La frammentazione del supercontinente ha provocato un forte aumento delle linee di costa e delle aree continentali influenzate dagli oceani. Come conseguenza, in queste aree sono aumentate precipitazioni atmosferiche, alterazione chimica delle rocce continentali e piattaforme sommerse circumcontinentali favorevoli alla deposizione di carbonati: tutti fattori che hanno favorito l'estra-



zione di  $\text{CO}_2$  dall'atmosfera. Inoltre, le masse continentali si sono spostate verso regioni tropicali ed equatoriali, dove alta temperatura e piovosità favoriscono l'alterazione chimica delle rocce e quindi l'estrazione di anidride carbonica dall'atmosfera: secondo alcune stime, la concentrazione di  $\text{CO}_2$  era scesa fino a meno di 200 parti per milione. C'è anche da tenere presente che 700 milioni di anni fa il Sole irradiava circa il cinque per cento in meno di calore rispetto a oggi. Tutto ciò ha provocato un drastico raffreddamento del pianeta: il ghiaccio si è esteso verso i tropici, causando un forte aumento dell'albedo terrestre, cioè della radiazione solare riflessa da superfici ghiacciate, rafforzando la tendenza al raffreddamento. Il risultato è quello che Paul F. Hoffman e Daniel P. Schrag della Harvard University hanno chiamato *snowball Earth*: Terra a «palla di neve» (si veda *Una Terra a palla di neve*, in «Le Scienze» n. 382, giugno 2000).

Probabilmente queste condizioni estreme sono durate per milioni di anni, con conseguenze drammatiche per le forme primitive di vita del neo-Proterozoico, tra 700 e 600 milioni di anni fa. Durante quel periodo la Terra ha rischiato di perdere ogni traccia di vita che si era sviluppata gradualmente nel corso dei due miliardi di anni precedenti e che resisteva in alcune nicchie ecologiche particolari. Per esempio intorno a flussi di fluidi idrotermali sul fondo dell'oceano ghiacciato in superficie.

Sovraposte alle formazioni rocciose che testimoniano condizioni glaciali si osservano formazioni carbonatiche, tipiche di mari caldi. Evidentemente c'è stata una drastica inversione del clima. Una spiegazione è che durante la fase di copertura glaciale la  $\text{CO}_2$  proveniente dall'interno della Terra veniva immessa in atmosfera dall'attività vulcanica e idrotermale. Ma la copertura di ghiaccio ai tropici impediva l'alterazione delle rocce continentali e l'estrazione di anidride carbonica dall'atmosfera. Come risultato si è avuto un accumulo in atmosfera di  $\text{CO}_2$  e la ripresa dell'effetto serra, che ha causato un aumento di temperatura, il conseguente scioglimento dei ghiacci tropicali e l'inizio di un nuovo ciclo. Sembra insomma che processi avvenuti nelle profondità della Terra abbiano provocato in pochi milioni di anni un gelo del pianeta seguito da un forte riscaldamento globale.

#### Genesi di catene montuose e clima

I movimenti delle zolle litosferiche sulla superficie del pianeta, il cui motore principale è nel mantello terrestre, portano anche alla collisione di blocchi continentali, causando l'innalzamento di grandi catene montuose. Un imponente esempio è dato dall'Himalaya e dall'altopiano tibetano.

Nel 1899 il geologo statunitense Thomas C. Chamberlain aveva proposto che l'innalzamento di grandi catene montuose provochi un aumento dell'erosione fisica e dell'alterazione chimica, e quindi dell'estrazione di  $\text{CO}_2$  dall'atmosfera, con un raffreddamento del clima globale. Questa ipotesi, dimenticata per quasi un secolo, è stata ripresa nel 1991 da Maureen Raymo e William Ruddiman, all'epoca alla Columbia University. Come stimare l'intensità dell'alterazione chimica dei continenti nel passato? Le rocce continentali contengono concentrazioni relativamente alte di rubidio (Rb), che produce un isotopo dello stronzo (Sr) per decadimento radioattivo: lo stronzo-87.

Come conseguenza si ha che il rapporto tra questo isotopo radiogenico e l'isotopo stabile stronzo-86 è elevato nei prodotti di alterazione dei continenti, trasportati in mare dai fiumi, ed è più alto del rapporto isotopico misurato nello stronzo immesso dal mantello nei fondali oceanici grazie a vulcanismo e idrotermalismo. Il rapporto isotopico tra stronzo-86 e stronzo-87 dell'acqua marina del passato si può ricostruire misurandolo in sedimenti carbonatici. Sedimenti con rapporto isotopico elevato indicano fasi di alterazione continentale intensa e viceversa.

Le variazioni della composizione isotopica dello stronzo si correlano con variazioni del contenuto di  $\text{CO}_2$  in atmosfera e con variazioni del clima, confermando l'ipotesi di Chamberlain (si vedano le figure nella pagina a fronte). In particolare l'innalzamento di Himalaya, Alpi e Ande, avvenuto a partire dal Cenozoico, è accompagnato da un aumento dell'alterazione chimica delle rocce continentali (e quindi del rapporto tra isotopi dello stronzo nell'acqua marina), una diminuzione di  $\text{CO}_2$  in atmosfera e un raffreddamento del clima.

Oltre a modificare la concentrazione di  $\text{CO}_2$  in atmosfera, l'innalzamento di catene montuose ha anche un effetto diretto sul clima: un esempio è il sistema Himalaya-Tibet. Il subcontinente indiano si è separato dal blocco continentale antartico, spostandosi poi attraverso quello che oggi è l'Oceano Indiano, e scontrandosi circa 45 milioni di anni fa contro il supercontinente asiatico. La collisione ha causato forti deformazioni della litosfera terrestre, con terremoti intensi e frequenti che ancora oggi investono queste regioni. Uno dei risultati è il graduale sollevamento dell'Himalaya e dell'altopiano tibetano, iniziato circa 45 milioni di anni fa e ancora in atto. L'altopiano tibetano ha un'elevazione media di quasi 5000 metri sul livello del mare e una superficie pari a circa la metà degli Stati Uniti.

Altopiano e Himalaya costituiscono una barri-

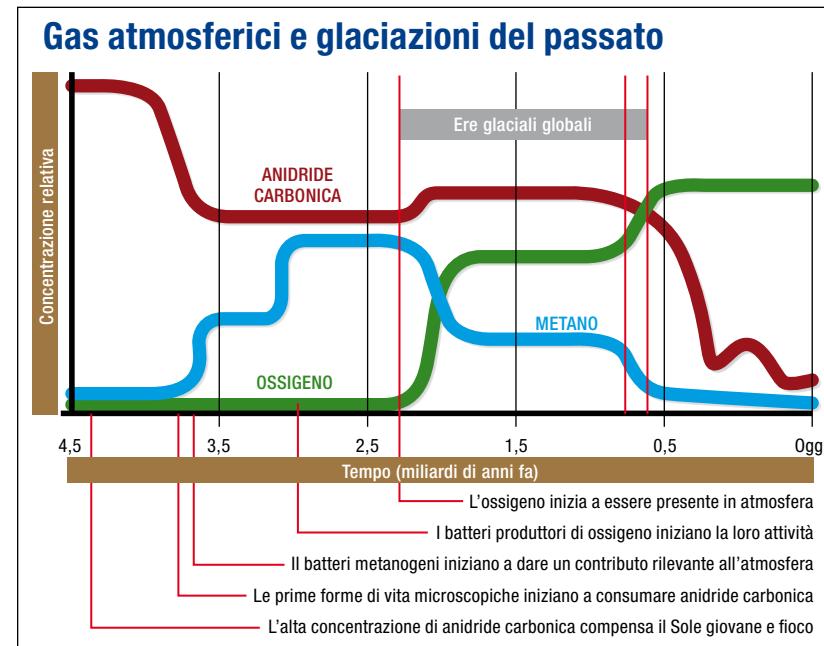
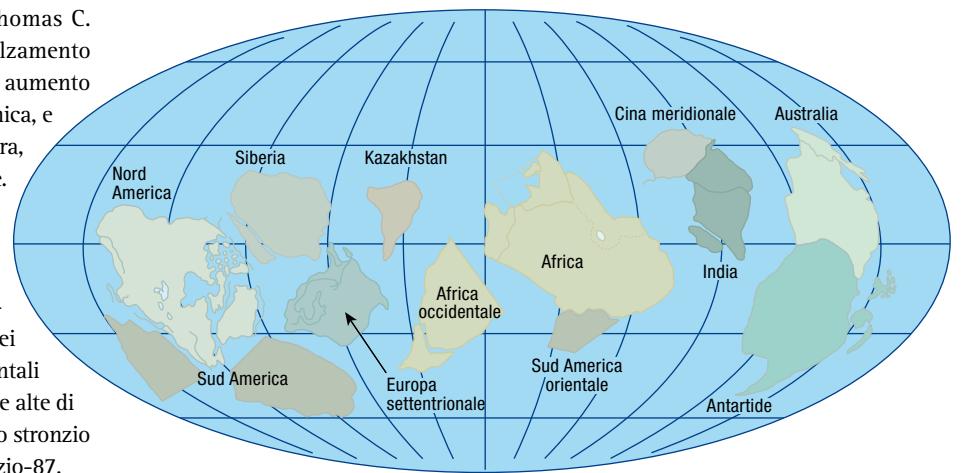
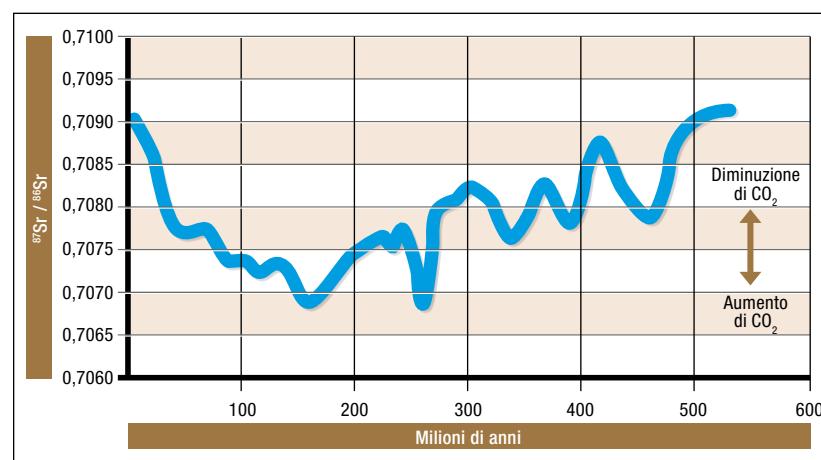


Illustrazione: Stefano Carrara; fonte dei dati: Quando il megano dominava il clima di James F. Kasting in «Le Scienze» n. 432, agosto 2004 (gas atmosferici); Una Terra a palli di neve, di Paul F. Hoffman e Daniel P. Schrag in «Le Scienze» n. 382, giugno 2000 (mappa Rodinia)

**LE CONCENTRAZIONI RELATIVE**  
dei principali gas atmosferici (escluso l'azoto) possono dar conto delle glaciazioni avvenute nel remoto passato. Circa 2,3 miliardi di anni fa i microrganismi metanogeni dovettero fronteggiare un aumento dell'ossigeno in atmosfera, che li portò a sopravvivere in un numero ridotto di nicchie ecologiche. La conseguente diminuzione del metano potrebbe aver raffreddato la Terra. Nella mappa in alto, il risultato della frammentazione del supercontinente Rodinia, avvenuta circa 700 milioni di anni fa.

**Riscaldamento da vulcanismo**  
All'altro estremo vi sono prove nella storia della Terra di periodi con clima estremamente caldo, causati anche questi da processi avvenuti all'interno del pianeta. Accenniamo come esempio a due eventi, uno avvenuto un centinaio di milioni di anni fa nel Cretaceo, l'altro circa 56 milioni di anni fa nel Paleocene/Eocene. Gli isotopi dell'ossigeno misurati in sedimenti marini risalenti alle due epoche suggeriscono che la temperatura dell'acqua era eccezionalmente elevata e il livello del mare più alto rispetto a quello attuale.

## Ricostruire il clima del passato con gli isotopi



Un forte aumento dell'attività magmatica che genera nuova crosta lungo le dorsali oceaniche, in particolare lungo la dorsale pacifica, si è verificato in contemporanea con il riscaldamento globale del Cretaceo. Come conseguenza, il fondale marino si è «gonfiato» e il livello del mare si è alzato.

Walter Pitman della Columbia University e Roger Larson dell'Università del Rhode Island hanno ipotizzato che il «motore» che fornisce calore al mantello terrestre, e che causa l'attività magmatica lungo le dorsali oceaniche e in altri «punti caldi», sia soggetto a forti pulsazioni. Il riscaldamento del clima registrato tra 110 e 100 milioni di anni fa sarebbe legato a una di queste pulsazioni, descrivibile così: materiale con temperatura molto elevata risale il mantello terrestre e giunto nelle vicinanze della superficie fonde in parte, causando un vulcanismo eccezionalmente intenso e l'im-

**VARIAZIONI CORRELATE.**  
La variazione nel tempo della composizione isotopica dello stronzo, indicata come  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ , presente in mare è correlata con la variazione temporale di anidride carbonica in atmosfera e, di conseguenza, con i cambiamenti climatici. Grazie all'analisi di sedimenti carbonatici precipitati dall'acqua di mare del passato è possibile ricostruire il rapporto  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  all'indietro nel tempo, e dunque stimare la parallela variazione dell'anidride carbonica.

missione nell'oceano e poi in atmosfera di grandi quantità di gas serra  $\text{CO}_2$  e  $\text{CH}_4$ . Secondo alcune ipotesi questi pennacchi (*plume*) hanno un'origine profonda (forse addirittura nella zona al confine tra mantello e nucleo, 2900 chilometri sotto i nostri piedi). Nello stesso intervallo di tempo l'inversione periodica del campo magnetico terrestre, che si pensa abbia origine nei movimenti convettivi del nucleo liquido esterno, ha smesso di funzionare.

Il riscaldamento globale avvenuto 56 milioni di anni fa, testimoniato dall'aumento di 5-6 gradi della temperatura superficiale degli oceani, si è accompagnato a un rapporto isotopico anomalo del carbonio contenuto nei carbonati che si può spiegare se grandi quantità di  $\text{CO}_2$  e  $\text{CH}_4$  sono state estratte dal fondo degli oceani per poi finire in atmosfera, causando un forte effetto serra. Qual è stata la causa? Circa 56 milioni di anni fa è iniziata l'apertura dell'Atlantico settentrionale con la separazione della Groenlandia dall'Europa. Questo processo si è accompagnato a un vulcanismo di intensità eccezionale, che ha immesso 10 milioni di chilometri cubi di basalti sui due margini dell'oceano che si stava aprendo. Oltre all'immissione diretta di  $\text{CO}_2$  e  $\text{CH}_4$  provenienti dal mantello, Henric Svensen, dell'Università di Oslo, ha documentato intrusioni basaltiche nei sedimenti che riempivano la depressione marina tra i due continenti, provocando l'espulsione dei due gas di origine organica dai sedimenti.

### Quanto durerà?

I casi citati mostrano che il clima terrestre è influenzato – oltre che da agenti esterni, principalmente il Sole – anche da processi interni che usano energia (calore) primordiale della Terra ed energia prodotta dal decadimento di elementi radioattivi.

È probabile sia vero anche l'inverso, cioè che in condizioni estreme il clima esterno possa modificare l'interno del pianeta. Si è teorizzato infatti che se la temperatura dell'atmosfera aumentasse di un centinaio di gradi, come certamente accadrà alla Terra in un futuro remoto (per nostra fortuna), il graduale riscaldamento della litosfera solida porterebbe a una diminuzione della sua rigidità tale da bloccare la tettonica a placche.

Sono esempi di come navighiamo sulla superficie di un sistema che funziona grazie a interazioni complesse e delicate fra le varie parti: nucleo metallico, mantello silicatico che produce calore e movimento, zolle litosferiche che si spostano in superficie, oceani, atmosfera e biosfera, di cui noi siamo una piccola parte. Ci si può domandare se e come questo sistema complesso continuerà a funzionare nei milioni di anni prossimi venturi. A presto un tentativo di risposta!