



# Il grande freddo della giovane Terra

Un pianeta infuocato, ricoperto da oceani di magma: è così che i libri di testo raccontano la Terra nei suoi primi 500 milioni di anni di vita. Ma una recente teoria suggerisce che la superficie avrebbe subito un rapido raffreddamento, dando origine a oceani e continenti. Con la possibilità, per la vita, di nascere molto prima

di John W. Valley

**D**urante la sua infanzia, iniziata circa quattro miliardi e mezzo di anni fa, la Terra brillava come una debole stella. La sua superficie era ricoperta da oceani di magma incandescente, ed era colpita di continuo da colossali macigni, alcuni grandi come piccoli pianeti, in orbita intorno al Sole appena nato. Le collisioni avvenivano a una velocità media pari a 75 volte quella del suono; al momento dello scontro, ognuno di questi corpi rocciosi produceva enormi fiammate, frantumandosi, fondendosi o persino sublimando. Ben presto il ferro, più denso degli altri composti presenti in superficie, iniziò a separarsi dal magma, andando a formare il nucleo metallico e liberando un'energia gravitazionale sufficiente a fontere l'intero pianeta. Gli impatti dei giganteschi meteoriti andarono avanti per centinaia di milioni di anni, formando in alcuni casi crateri con un diametro di più di 1000 chilometri. Contemporaneamente, nelle profondità della Terra, il decadimento degli elementi radioattivi produceva calore a velocità sei volte superiori a quella attuale.

Fu solo quando queste condizioni proibitive si attenuarono che la roccia fusa poté solidificarsi, formando la crosta e dando origine ai continenti. Solo allora l'atmosfera densa e umida poté precipitare sotto forma di acqua allo stato liquido, e le prime forme di vita furono in grado di sopravvivere ed evolversi.

Ma quanto tempo è passato esattamente tra la nascita della Terra e il suo raffreddamento? La maggior parte degli scienziati ritiene che la fase «infernale» sia durata 500 milioni di anni, il cosiddetto eone Adeano. A sostegno di questa ipotesi c'è l'assenza di rocce intatte più antiche di quattro miliardi di anni, e l'età dei primi fossili, che sono ancora più giovani.

Negli ultimi cinque anni, però, vari geologi, tra cui il mio gruppo all'Università del Wisconsin, hanno scoperto dozzine di antichi cristalli di zircone con una composizione chimica che sta cambiando il modo di pensare al primo periodo di vita del pianeta. Le insolite proprietà di questi minerali longevi hanno fatto sì che i cristalli conservassero indizi molto significativi sulle condizioni ambientali esistenti al momento della loro formazione. Queste minuscole capsule del tempo contengono le prove che potrebbero essere apparsi oceani in grado di ospitare forme di vita primitive, e forse persino continenti, 400 milioni di anni prima di quanto si pensasse.

Gli scienziati hanno cercato di calcolare la velocità di raffreddamento della Terra fin dal XIX secolo. Benché i primordiali oceani di magma ribollissero a temperature di oltre 1000 gradi Celsius, un inte-



Time Life Pictures/Getty Images/Laura Ronchi

LA GIOVANE TERRA nell'immagine che illustrava la copertina di «Life» dell'8 dicembre 1952.

#### L'AUTORE

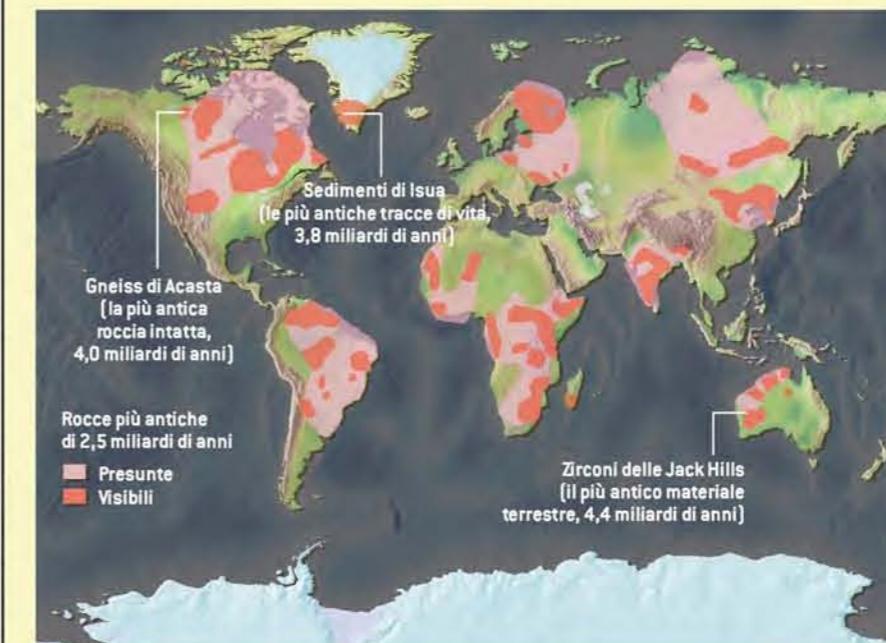
JOHN W. VALLEY ha studiato siti geologici del Nord America, dell'Australia, della Groenlandia e della Scozia. Presiede la Mineralogical Society of America e insegna geologia all'Università del Wisconsin.

All'inizio degli anni ottanta, la scoperta di alcuni granuli di zircone nelle Jack Hills e sul monte Narryer, nell'Australia occidentale, aggiunse nuove informazioni sull'infanzia del pianeta. Quei cristalli costituivano il più vecchio materiale terrestre conosciuto all'epoca, con un'età stimata di 4,3 miliardi di anni. Ma l'informazione che contenevano era ambigua, anche perché i geologi non erano sicuri dell'identità della roccia madre. Una volta formati, infatti, i cristalli di zircone sono così resistenti che sopravvivono anche se la roccia madre affiora in superficie e viene distrutta dall'erosione e dagli agenti atmosferici. Inoltre vento e acqua possono trasportare i granuli rimasti a grandi distanze prima che questi finiscano intrappolati in depositi di sabbia o ghiaia, che possono poi solidificare in rocce sedimentarie. Probabilmente gli zirconi rinvenuti all'interno di un banco di ghiaia cementata chiamato «conglomerato delle Jack Hills» erano lontani migliaia di chilometri dal luogo d'origine.

Tuttavia, per la maggior parte dei geologi le temperature iniziali indiscutibilmente elevate e gli scarsi indizi geologici sembravano indicare un lungo periodo di clima rovente. La più antica roccia intatta conosciuta è lo gneiss di Acasta, un campione di quattro miliardi di anni fa scoperto nei Territori del Nord-Ovest del Canada, che però si è formata a grande profondità e non dà nessuna informazione sull'ambiente superficiale. L'opinione prevalente era che le infernali condizioni alla superficie del pianeta avessero cancellato qualunque roccia formatasi in precedenza. Le più antiche rocce conosciute che si sono formate sott'acqua (e quindi a temperature relativamente fredde) risalgono a 3,8 miliardi di anni fa. Questi sedimenti, emersi a Isua, nella Groenlandia sud-occidentale, contengono anche le più antiche tracce di vita.

Per questo, malgrado l'entusiasmo per la scoperta di pezzi così antichi del pianeta, la maggior parte degli scienziati ha conti-

## LE ROCCE PIÙ ANTICHE DEL PIANETA



Rocce che hanno più di 2,5 miliardi di anni affiorano, o si trovano appena sotto il livello del suolo, in molti punti del pianeta [in rosso], ma altre sono probabilmente nascoste sotto rocce più giovani in aree ancora più estese [in rosa]. In una di queste regioni potrebbero essere scoperti cristalli di zircone antichi quanto quelli rinvenuti sulle Jack Hills, nell'Australia occidentale.



LE ROCCE SEDIMENTARIE delle Jack Hills (sopra), in Australia, contengono gli zirconi più antichi della Terra. I geologi hanno frantumato centinaia di chili di roccia (sotto) per trovare i 20 cristalli che testimoniano la presenza di temperature più basse oltre quattro miliardi di anni fa.



nuato ad accettare lo scenario adeano. Solo nel 1999, grazie ad alcuni progressi tecnologici, è stato possibile studiare meglio gli zirconi trovati in Australia e mettere così in discussione la visione di una Terra primordiale dal clima incandescente.

#### Dalle viscere della Terra

Gli zirconi australiani non hanno ceduto facilmente i loro segreti. Le Jack Hills sono una zona arida e polverosa 800 chilometri a nord di Perth, la città più isolata di tutta l'Australia. Il conglomerato delle Jack Hills

si è formato tre miliardi di anni fa e segna il limite nord-occidentale di un ampio gruppo di formazioni rocciose, tutte di età superiore ai 2,6 miliardi di anni. Per recuperare una minuscola quantità di zirconi abbiamo dovuto raccogliere centinaia di chilogrammi di roccia, e trasportarli da quei luoghi sperduti fino al laboratorio, dove le pietre sono state frantumate e selezionate. È stato un po' come cercare pochi granelli di una particolare sabbia su una spiaggia.

Una volta estratti dalla roccia madre, i singoli cristalli possono essere datati facilmente, perché lo zircone è un eccellente

orologio geologico: oltre a essere molto longevo contiene tracce di uranio radioattivo, che decade in piombo a una velocità nota. Quando un magma solidifica e forma lo zircone, gli atomi di zirconio, silicio e ossigeno si legano in proporzioni esatte ( $ZrSiO_4$ ), creando la struttura cristallina caratteristica di questo minerale. In alcuni casi l'uranio si sostituisce a uno degli elementi, ed è presente in tracce come impurità. Gli atomi di piombo, invece, sono troppo grandi per sostituire efficacemente gli altri elementi del reticolato, per cui al momento della sua formazione lo zircone ne è sostanzialmente privo. L'«orologio» a uranio-piombo parte appena lo zircone cristallizza, e il rapporto tra piombo e uranio aumenta con l'età del cristallo. Gli scienziati sono in grado di calcolare l'età di uno zircone non danneggiato con un margine di errore dell'uno per cento, che in termini geologici significa 40 milioni di anni.

La datazione di parti specifiche di un cristallo divenne possibile nei primi anni ottanta, quando William Compston e collaboratori dell'Australian National University di Canberra inventarono una micro-

## In sintesi / La storia in uno zircone

- I geologi hanno ritenuto per lungo tempo che le condizioni infernali presenti sulla Terra al momento della sua nascita, 4,5 miliardi di anni fa, abbiano iniziato ad attenuarsi circa 3,8 miliardi di anni fa.
- Oggi, grazie a minuscoli cristalli di zircone, un minerale che conserva tracce di come e quando si è formato, sembra invece che il raffreddamento della Terra possa essere avvenuto molto prima, forse 4,4 miliardi di anni fa.
- Gli zirconi più vecchi presentano una composizione chimica che indica un ambiente di formazione umido e relativamente freddo: le condizioni necessarie allo sviluppo della vita.

sonda a ioni, battezzata SHRIMP (*Sensitive High Resolution Ion Microprobe*). In genere gli zirconi sono invisibili a occhio nudo, ma questa sonda emette un fascio di ioni così preciso da riuscire a staccare un piccolo numero di atomi dalla superficie di una pietra piccolissima; poi uno spettrometro di massa misura la composizione degli atomi confrontandone la massa. Gli zirconi delle Jack Hills furono datati per la prima volta nel 1986 proprio dal gruppo di Compston, insieme a Robert Pidgeon, Simon A. Wilde e John Baxter, della Curtin University of Technology, sempre in Australia.

Sapendo di questi precedenti, mi rivolsi a Wilde, che accettò di ripetere le vecchie datazioni degli zirconi basate sul metodo uranio-piombo e inserirle nella tesi di dottorato di William H. Peck, all'epoca mio studente e oggi docente alla Colgate University. Nel maggio 1999 Wilde analizzò 56 cristalli, ancora non datati, usando la versione evoluta dello SHRIMP, e ne trovò cinque di età anteriore a quattro miliardi di anni: il più antico risaliva addirittura a 4,4 miliardi di anni fa. Età simili erano state rilevate su campioni provenienti dalla Luna o da Marte, e le meteoriti in genere

protoni e dieci neutroni, che compone circa lo 0,2 per cento di tutto l'ossigeno sulla Terra) e l'ossigeno-16 ( $O^{16}$ , l'isotopo comune, con otto protoni e otto neutroni, che forma il 99,8 per cento dell'ossigeno totale). Questi isotopi sono detti stabili perché, non essendo soggetti a decadimento radioattivo, non cambiano nel tempo. Tuttavia, le proporzioni di  $O^{18}$  e  $O^{16}$  racchiusi in un cristallo differiscono a seconda della temperatura alla quale il cristallo si è formato.

Il rapporto isotopico tra  $O^{18}$  e  $O^{16}$  è conosciuto per il mantello terrestre (lo strato profondo 2800 chilometri che si trova sotto i continenti e la crosta oceanica, a loro volta dello spessore di 5-40 chilometri). I magmi formatisi nel mantello, infatti, presentano sempre un rapporto isotopico molto simile. Per semplicità, i geochimici misurano questi rapporti in relazione a quello dell'acqua di mare, esprimendoli nella cosiddetta notazione delta ( $\delta$ ). Il  $\delta O^{18}$  dell'oceano è zero per definizione, mentre il  $\delta O^{18}$  dello zircone proveniente dal mantello è 5,3. Lo zircone ha perciò un rapporto tra  $O^{18}$  e  $O^{16}$  maggiore dell'acqua di mare.

Per questo motivo, io e Peck ci aspettavamo di trovare un valore di circa 5,3 per

pioggia o con l'acqua dell'oceano acquisiscono un alto rapporto isotopico tra  $O^{18}$  e  $O^{16}$ . Quando queste rocce con elevati  $\delta O^{18}$  sono sotterrate e fuse formano magmi che conservano questi valori, che a loro volta sono propagati agli zirconi durante il processo di cristallizzazione. In altre parole, per formare zirconi e magmi con un alto  $\delta O^{18}$  è necessario che sulla superficie vi siano acqua allo stato liquido e basse temperature. Nessun altro processo conosciuto è in grado di fare altrettanto.

Rapporti isotopici così alti negli zirconi delle Jack Hills implicavano la presenza di acqua sulla superficie terrestre almeno 400 milioni di anni prima della formazione delle rocce sedimentarie più antiche, quelle di Isua, in Groenlandia. Se è così, probabilmente c'erano oceani che hanno reso il clima primordiale della Terra più simile a una sauna che a una palla di fuoco.

### Indizi continentali

Ovviamente non potevamo accettare conclusioni così sconvolgenti sul passato del nostro pianeta basandoci solo su una manciata di minuscoli cristalli. Ritardam-



Aaron J. Cavosie/Università del Wisconsin a Madison

## Forse il clima della giovane Terra era abbastanza freddo da consentire la formazione di oceani

sono ancora più antiche: ma niente di così vecchio era mai stato trovato (o previsto) sulla Terra. L'opinione comune era che zirconi così vecchi, se mai fossero esistiti, sarebbero stati sicuramente distrutti dalle condizioni del periodo Adeano. Ma nessuno immaginava che la scoperta più sorprendente dovesse ancora arrivare.

### Tracce di antichi mari

Avevamo chiesto gli zirconi australiani a Wilde perché eravamo in cerca di un campione ben conservato del più antico ossigeno della Terra. Sapevamo che uno zircone è in grado di indicare sia quando la roccia madre si è formata sia il modo in cui l'ha fatto. In particolare usavamo i rapporti tra i diversi isotopi dell'ossigeno per stimare le temperature dei processi di formazione di magmi e rocce.

Era stato sbalordito. Che cosa significavano rapporti isotopici così alti? In rocce più giovani la risposta sarebbe stata ovvia, visto che campioni simili sono comuni. Uno scenario tipico è che le rocce a bassa temperatura presenti sulla superficie della Terra che reagiscono chimicamente con la

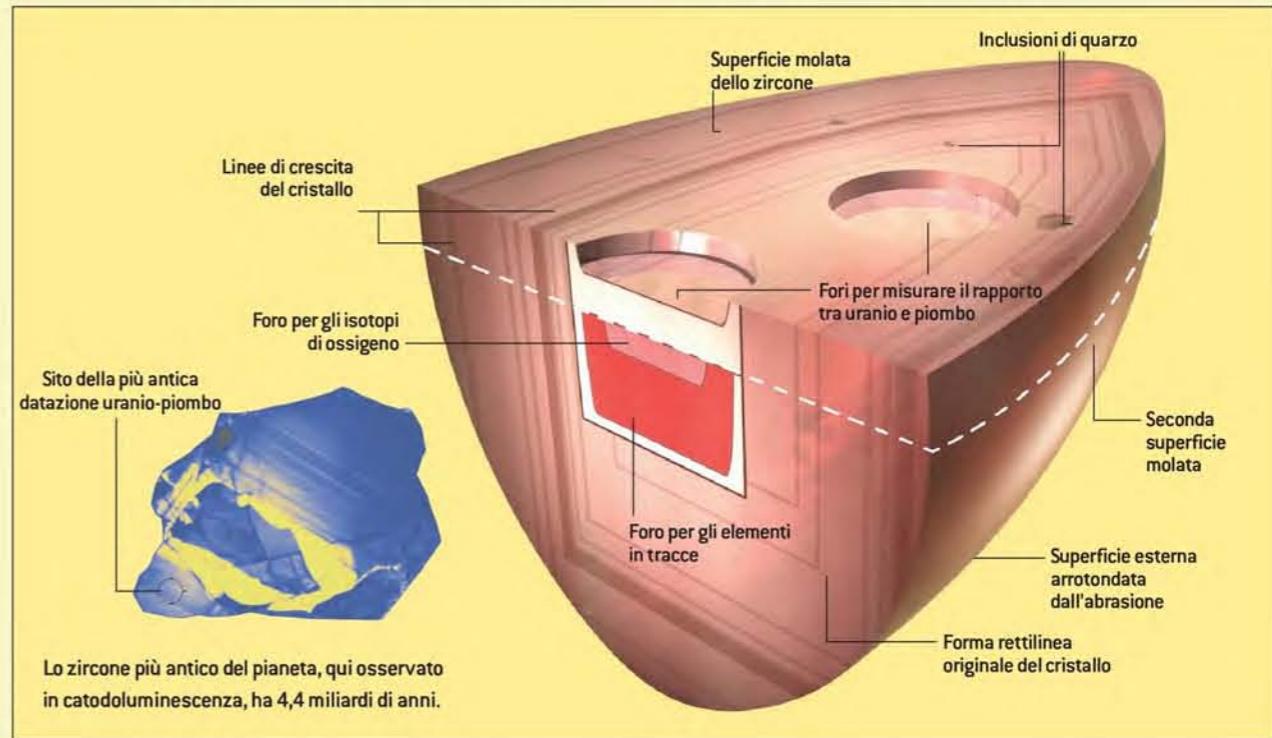
il mantello primitivo quando analizzammo gli zirconi delle Jack Hills all'Università di Edimburgo. John Craven e Colin Graham ci hanno assistito nell'uso di una nuova microsonda a ioni, particolarmente indicata per misurare i rapporti tra gli isotopi dell'ossigeno. Avevamo già lavorato insieme, nei dieci anni precedenti, per perfezionare la tecnica di misurazione, riuscendo alla fine ad analizzare campioni un milione di volte più piccoli di quelli analizzabili nel mio laboratorio. Dopo 11 giorni di analisi e pochissime ore di sonno, completammo le misurazioni, scoprendo che le nostre previsioni erano sbagliate. I valori del  $\delta O^{18}$  degli zirconi arrivavano a 7,4.

Era stato sbalordito. Che cosa significavano rapporti isotopici così alti? In rocce più giovani la risposta sarebbe stata ovvia, visto che campioni simili sono comuni. Uno scenario tipico è che le rocce a bassa temperatura presenti sulla superficie della Terra che reagiscono chimicamente con la

## ESTRARRE LE PROVE

Dall'analisi di un singolo cristallo di zircone [in sezione, a destra] si possono ottenere montagne di dati sull'ambiente primordiale del nostro pianeta. Il primo passaggio del procedimento prevede che gli zirconi siano inseriti nella resina epossidica, e poi molati e lucidati fino a ottenere una superficie pulita. Un microscopio elettronico a scansione identifica le dinamiche di accrescimento dello zircone ed eventuali frammenti di altri minerali inclusi durante la crescita. Le inclusioni di quarzo, per esempio, sono comuni negli zirconi provenienti dal granito, una roccia caratteristica dei continenti. Una microsonda a ioni crea un piccolo foro sparando un sottile fascio di ioni che causa il distacco di un piccolo numero di atomi, i quali vengono identificati confrontandone le masse. Per determinare l'età del cristallo, si misura il numero di atomi

di uranio e di piombo, due impurità intrappolate nella struttura atomica dello zircone. Poiché l'uranio decade in piombo a una velocità costante, quanto più piombo è presente rispetto all'uranio, tanto più antico è il cristallo. Poi si mola ancora la superficie fino a esporre uno strato più profondo del cristallo, effettuando un secondo foro nello stesso punto del primo per misurare gli atomi di ossigeno, uno dei tre elementi che compongono lo zircone. Il rapporto fra alcuni isotopi di ossigeno (atomi di ossigeno con massa differente) indica se la roccia madre del cristallo era calda o fredda. Infine, si pratica un terzo foro per misurare l'abbondanza di alcuni elementi in tracce (impurità che compongono meno dell'uno per cento della struttura molecolare del cristallo). Alcuni di questi elementi sono più comuni nella crosta continentale.

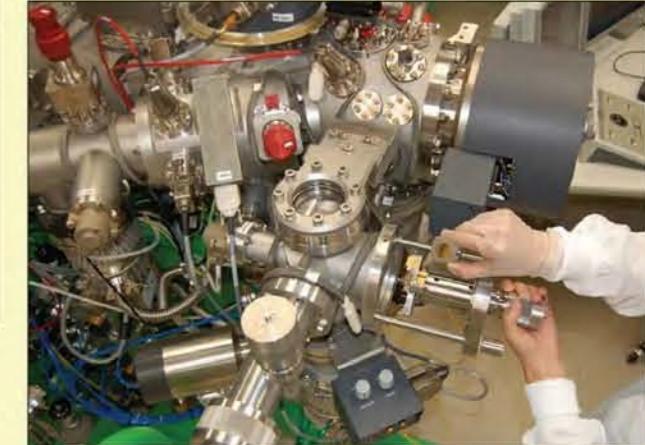


Lo zircone più antico del pianeta, qui osservato in catodoluminescenza, ha 4,4 miliardi di anni.

John W. Valley [laboratorio], Simon A. Wilde, Curtin University of Technology [zircone]; Alfred T. Kamejyan [fotografia]: Aaron J. Cavosie/Università del Wisconsin a Madison [schema dello zircone e zirconi rossi]

### UNO SGUARDO RAVVICINATO

A fianco: gli zirconi rossi fotografati su una moneta da dieci centesimi di dollaro provengono dalla stessa roccia dove è stato trovato il cristallo più antico che si conosca. A destra, la microsonda a ioni usata nel laboratorio dell'autore all'Università del Wisconsin a Madison. È in grado di analizzare i rapporti tra isotopi di elementi in tracce da punti fino a 15 volte più piccoli del diametro del cristallo.



tinenti e le altre caratteristiche moderne del pianeta. Per scoprirla, dovemmo studiare più da vicino l'interno di quei cristalli.

Anche il più piccolo degli zirconi contiene altri materiali, incapsulati durante la crescita del cristallo. Queste inclusioni ci dicono molto sull'origine di uno zircone, e altrettanto fanno lo studio della dinamica dell'accrescimento del cristallo e della composizione degli elementi presenti in tracce. Quando analizzammo lo zircone di 4,4 miliardi di anni scoprimmo che conteneva frammenti di altri minerali, tra cui il quarzo. Fu piuttosto sorprendente, perché il quarzo è raro nelle rocce primitive, e probabilmente era assente dalla crosta terrestre primordiale. La maggior parte del quarzo proviene da rocce granitiche, comuni nella crosta continentale più recente.

Se gli zirconi delle Jack Hills si fossero rivelati di origine granitica, ci saremmo trovati di fronte alle tracce del primo continente formatosi sulla Terra. Ma la prudenza era d'obbligo. Il quarzo, infatti, si può formare durante le ultime fasi della

## Gli zirconi australiani potrebbero essere le tracce del primo continente

cristallizzazione di un magma anche se la roccia che lo ospita non è granitica. Un quarzo di questo tipo, però, è molto più raro. Per fare un esempio: alcuni zirconi e granuli di quarzo sono stati trovati sulla Luna, dove non è mai esistita una crosta granitica simile a quella dei continenti. Qualcuno ha ipotizzato che gli zirconi più antichi si siano formati in un ambiente più simile alla Luna primordiale, o forse in seguito a fenomeni che sono andati via via scomparendo, come l'impatto di meteoriti giganti o l'eruzione di magma proveniente da grandi profondità. Ma fino a oggi non ci sono prove convincenti.

Nel frattempo, altri indizi a favore dell'ipotesi di una crosta di tipo continentale arrivarono dall'analisi degli elementi presenti in tracce negli zirconi (vale a dire da elementi che sostituiscono lo zirconio in quantità inferiori all'uno per cento). In effetti, gli zirconi delle Jack Hills presentano alte concentrazioni di questi elementi, nonché strutture di europio e cerio, formatesi principalmente durante la cristallizzazione della crosta, il che confermava che

gli zirconi si erano formati subito sotto la superficie della Terra, e non nel mantello. Inoltre, i rapporti tra gli isotopi radioattivi del neodimio e dell'afnio (due elementi usati per datare la formazione delle croste continentali) indicavano che 4,4 miliardi di anni fa si era già formata una parte significativa della crosta continentale.

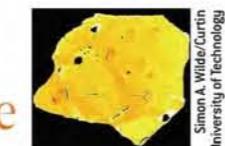
Ulteriori conferme sono arrivate dalla distribuzione degli zirconi arcaici. In alcuni dei campioni delle Jack Hills, la percentuale di zirconi con un'età superiore ai quattro miliardi di anni supera il dieci per cento. Inoltre la superficie di queste pietre è notevolmente erosa, e le facce angolari dei cristalli, originariamente spigolose, sono ora arrotondate, segno che le pietre sono state trasportate dal vento per lunghe distanze. Ma com'è possibile che questi cristalli, pur avendo viaggiato per centinaia, o migliaia, di chilometri siano ancora così concentrati? E come hanno evitato di essere seppelliti e fusi all'interno del mantello, prima che la crosta continentale fosse abbastanza stabile?

za di età è il risultato di processi tettonici nei quali si ha la fusione della crosta continentale, e il riciclaggio degli zirconi in essa contenuti. Attualmente si sta cercando di capire se anche gli zirconi delle Jack Hills hanno avuto un'origine simile.

Più di recente, Bruce Watson del Rensselaer Polytechnic Institute e Mark Harrison dell'Australian National University hanno trovato in questi zirconi livelli di titanio inferiori al normale, il che implicherebbe una temperatura dei magmi d'origine tra 800 e 650 gradi Celsius. Temperature così basse sarebbero possibili solo in una roccia di tipo granitico. La maggior parte delle rocce non granitiche, infatti, fonde a temperature maggiori, quindi i loro zirconi dovrebbero contenere più titanio.

### Uno zircone è per sempre

Dal 1999, quando analizzammo i rapporti isotopici dell'ossigeno contenuto in quei cinque zirconi provenienti dalle Jack Hills, i dati a sostegno della nostra



Simon A. Wilde/Curtin University of Technology

ipotesi si sono moltiplicati. Nei laboratori di Perth, Canberra, Pechino, Los Angeles, Edimburgo, Stoccolma e Nancy sono stati analizzati decine di migliaia di zirconi australiani, usando la microsonda a ioni e ad altre tecniche alla ricerca dei pochi esemplari di età superiore ai quattro miliardi di anni.

Inoltre, è stata riferita la scoperta in varie località di centinaia di zirconi con un'età di 4,4-4 miliardi di anni. Zirconi così antichi sono stati rinvenuti da David Nelson e colleghi, del Geological Survey of Western Australia, 300 chilometri a sud delle Jack Hills. I geochimici stanno sondando altre regioni del pianeta la cui formazione risalgia a periodi altrettanto antichi, sperando di trovare anche fuori dall'Australia zirconi con più di 4,1 miliardi di anni.

L'intensificarsi delle ricerche ha favorito la nascita di nuove tecnologie. Cavigie è riuscito a raggiungere una precisione molto maggiore nelle analisi, trovando più di 20 zirconi delle Jack Hills con un elevato rapporto isotopico tra O<sup>18</sup> e O<sup>16</sup>, il che indica basse temperature superficiali e la

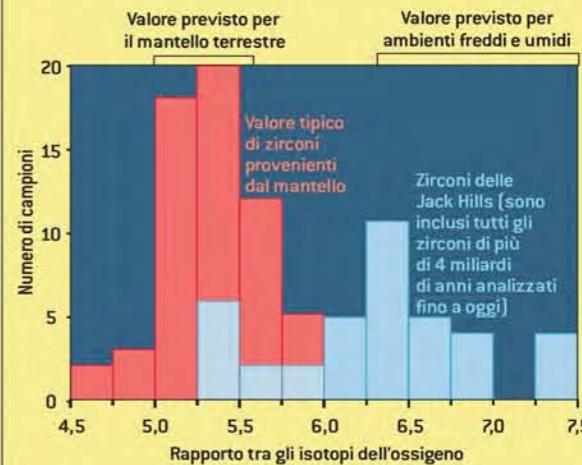
## IL PIANETA IN UN CRISTALLO

**G**li zirconi delle Jack Hills hanno cambiato il nostro modo di pensare alla Terra primordiale. Questi cristalli sono il materiale terrestre più antico mai scoperto: centinaia di essi si sono formati più di quattro miliardi di anni fa. Inoltre, molti di quei

cristalli presentano evidenti tracce chimiche dell'esistenza di acqua allo stato liquido, e forse persino di continenti, in un'epoca in cui si riteneva che la Terra fosse niente più che una palla di magma incandescente.

### UN AMBIENTE FRESCO E UMIDO

I rapporti isotopici dell'ossigeno degli zirconi delle Jack Hills (in blu), che arrivano fino a 7,5, sono possibili solo se la loro roccia madre si è formata in un ambiente relativamente freddo e umido vicino alla superficie terrestre. Se il pianeta fosse stato coperto da oceani di magma quando si sono formati gli zirconi, i valori sarebbero raggruppati intorno a 5,3. È questo, infatti, il valore di tutti i cristalli originati da rocce calde provenienti dall'interno della Terra (in rosso).



### CONTINENTI PRIMORDIALI?

Le superfici smussate degli zirconi delle Jack Hills indicano che il vento, e probabilmente anche l'acqua, hanno trasportato questi cristalli per lunghe distanze, forse attraverso masse continentali (a fianco). Gli zirconi trovati vicino al luogo d'origine, invece, conservano spigoli vivi (a destra). L'abbondanza di zirconi smussati nelle Jack Hills suggerisce che le rocce madri fossero molto diffuse.



presenza di oceani già 4,2 miliardi di anni fa. Io e i miei colleghi stiamo proseguendo le ricerche usando una microsonda a ioni di ultimissima generazione.

Molte delle nostre domande troveranno una risposta se si scopriranno frammenti della roccia originaria in cui si formarono gli zirconi. Ma, anche se non la trovassimo mai, in quelle minuscole capsule del tempo di zircone c'è ancora moltissimo da scoprire.

### PER APPROFONDIRE

POLLACK H.N., *Thermal Characteristics of the Archean*, in L.D. Ashwal e M.J. De Wit (a cura di), *Greenstone Belts*, Clarendon Press, 1997.

VALLEY J.W., PECK W.H., KING E.M. e WILDE S.A., *A Cool Early Earth*, in «Geology», Vol. 30, n. 4, pp. 351-354, aprile 2002.

CAVOSIE A.J., VALLEY J.W., WILDE S.A. ed Edinburgh Ion Microprobe Facility, *Magma 80180 in 4400-3900 Ma Detrital Zircons: A Record of the Alteration and Recycling of Crust in the Early Archean*, in «Earth and Planetary Science Letters», Vol. 235, n. 3, pp. 663-681, 15 luglio 2005.

Il sito dell'autore è consultabile su [www.geology.wisc.edu/zircon/zircon\\_home.html](http://www.geology.wisc.edu/zircon/zircon_home.html).