

Sotto la crosta: studiare la parte nascosta della Terra

di **Donato Ramani**

Del nostro pianeta, vediamo - e possiamo studiare direttamente - solo la parte più superficiale. Per ricostruire la struttura e la dinamica delle zone più profonde serve una combinazione di dati sperimentali e di simulazioni basate su modelli chimici e fisici.



Il sisma dell'agosto 2016, con epicentro il centro Italia, ci interroga sulla conoscenza che abbiamo della Terra oggi

In Italia la terra trema di continuo. Ce lo hanno ricordato il terribile sisma che a fine agosto 2016 ha scosso Lazio e Marche, con epicentro tra i paesi di Amatrice, Accumoli e Arquata del Tronto. E pochi mesi dopo, a fine ottobre, la serie di forti movimenti tellurici che ha colpito l'area tra Umbria e, di nuovo, Marche. Nel quadro angoscioso descritto dai media, l'attenzione di tutti è tornata a rivolgersi a quei fenomeni che nascono nelle viscere della Terra e arrivano fino a noi, manifestandosi improvvisi, potenti

e distruttivi. Verso quei luoghi profondi si concentra anche il lavoro dei ricercatori, intenti a conoscere la composizione e le dinamiche del pianeta per comprendere come e perché si muovono le placche tettoniche, quelle enormi porzioni di litosfera – la parte della Terra composta da crosta e porzione superficiale del mantello – che in superficie comprendono acque e terre emerse e i cui movimenti sono responsabili di eventi diversi, tra i quali, per l'appunto, i terremoti.



Schema delle conseguenze di un terremoto sulle rocce

OBIETTIVO: LE PROFONDITÀ DELLA TERRA

Un'attività complessa, quella degli scienziati, non solo per la dimensione spaziale e temporale dei fenomeni analizzati, ma anche perché la Terra, al suo interno, rimane uno scrigno pressoché inviolabile. Scendere negli abissi traforando la superficie per capire che succede lì sotto? Impossibile. Basti dire che un celebre progetto di perforazione portato avanti dall'allora URSS a partire dal 1970 nella Penisola di Kola – a tutt'oggi tra gli scavi più profondi prodotti artificialmente – arrivò dopo più di vent'anni di lavoro poco oltre i 12 km. Un'inezia rispetto agli oltre 6300 km del raggio terrestre. La letteratura, in questo campo, ci ha regalato avventure straordinarie, come quella immaginata da Jules Verne, nel suo *Viaggio al centro della Terra*. Lì, il cratere di un vulcano islandese, lo Snæffels, apriva agli studiosi protagonisti un passaggio verso gli abissi. Per carpire i segreti dell'interno del globo, la scienza, invece, ha sviluppato una quantità di approcci che, in un viaggio altrettanto affascinante, ci trasportano nello spazio e nel tempo, dalla superficie del pianeta fino alle sue profondità, dalla formazione del Sistema Solare fino ai giorni nostri.

L'IMPORTANZA DEL MANTELLO

«Le nostre conoscenze dirette sul nostro pianeta si fermano a pochi chilometri sotto la superficie»

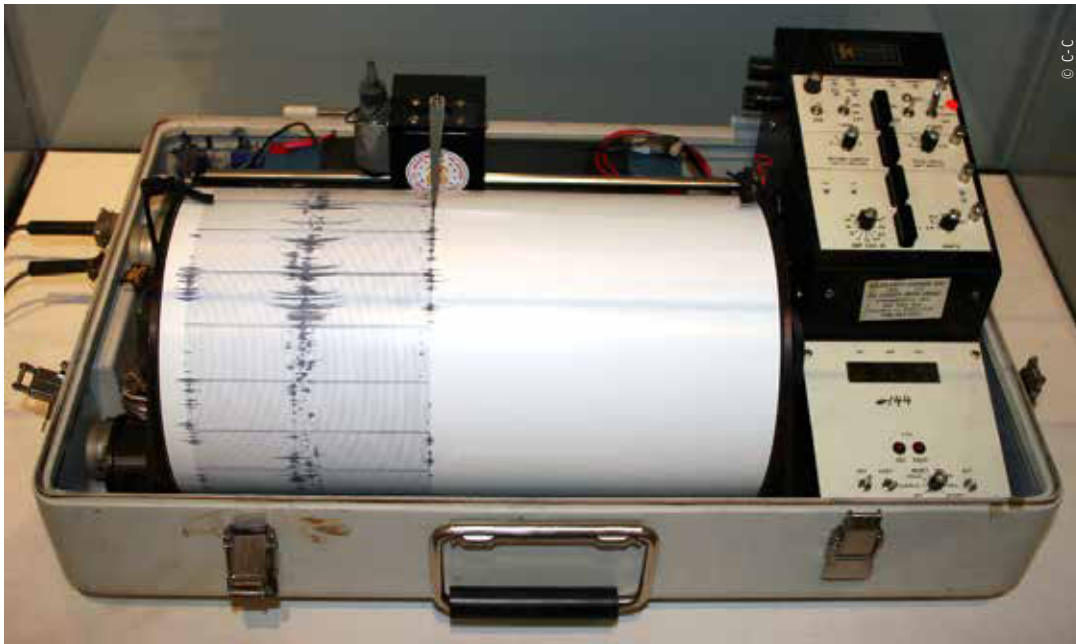
conferma il professor Mauro Precipe, del Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università di Torino. «Per studiare com'è fatta la Terra al suo interno e le sue dinamiche dobbiamo quindi affidarci a metodi indiretti. Tra questi ci sono le simulazioni, usate per comprendere le caratteristiche e il comportamento del mantello terrestre, che si estende fino a 2900 km di profondità. È un'area fondamentale da studiare, perché è quella nella quale hanno origine i fenomeni alla base del movimento delle placche tettoniche e dell'attività sismica. Di conseguenza, per capire come nascono gli eventi che osserviamo in superficie dobbiamo sapere come è fatto il mantello e come funziona.»

STUDIARE LE METEORITI PER CAPIRE LA TERRA

In particolare, in questo campo gli studi si concentrano sulla composizione chimica e mineralogica di questi strati interni, sulle caratteristiche elastiche dei minerali e sulla loro densità. Questi fattori dipendono direttamente dalla pressione e dalla temperatura che, a loro volta, sono in funzione diretta delle profondità. Il punto di partenza per queste ricerche arriva da un passato remotissimo. Spiega Precipe: «Per iniziare il nostro lavoro dobbiamo anzitutto sapere quali elementi sono presenti sul nostro pianeta e in quale abbondanza. Per farlo, si usa come riferimento una speciale classe di meteoriti cadute sulla Terra, la classe delle condriti carbonacee, ritenuta rappresentativa del materiale che costituiva la nebulosa solare miliardi di anni fa. Da questa nebulosa si è formato tutto il Sistema Solare e quindi anche la Terra. Queste meteoriti rappresentano lo standard da cui partire per stimare la composizione chimica globale del pianeta. Ciò stabilito, il nostro compito è comprendere come i diversi elementi e minerali siano distribuiti dalla superficie fino al nucleo terrestre e in quali condizioni fisico-chimiche».



Frammento di un meteorite chimicamente appartenente alla classe delle condriti carbonacee



Sismografo

MODELLI DI COMPOSIZIONE E PROPRIETÀ CHIMICHE

Prosegue il professore: «Fissate, come abbiamo detto, le composizioni chimiche che tengono conto di ciò che sappiamo della chimica globale del pianeta e considerati i processi che trasportano gli elementi più pesanti verso il nucleo, attraverso calcoli basati sulla termodinamica si costruiscono dei profili di temperatura e pressione (profili P/T), quelli che si possono trovare all'interno del globo alle diverse profondità. Attraverso i profili P/T si fanno dunque delle previsioni sui minerali presenti nelle aree interne, nelle diverse condizioni». Ipotizzata così la sua composizione chimica e mineralogica, gli scienziati possono stimare le proprietà elastiche e la densità del mantello alle diverse profondità, proprietà importantissime perché, a loro volta, correlate con la velocità di propagazione delle onde sismiche generate dai terremoti.

Come si fa a capire se i modelli sono affidabili? Il principale confronto è quello con la cosiddetta tomografia sismica, ossia lo studio dell'interno del pianeta attraverso onde prodotte artificialmente o dai sismi. Spiega Prencipe: «La correttezza di un dato profilo P/T è stabilita dal raffronto tra i profili di velocità sismica effettivamente osservati e quelli stimati in base ai calcoli termodinamici, fatti al computer. Lo stesso confronto è utile anche per comprendere, a posteriori, se la composizione chimica scelta come assunto di partenza per i modelli utilizzati fosse valida». I due metodi, simulazioni da un lato e osservazioni sperimentali dall'altro, messi assieme, danno un quadro piuttosto verosimile della composizione della Terra.

LA TERRA AI RAGGI X

Visto che a tutt'oggi è considerata il metodo sperimentale d'elezione per sondare l'interno del pianeta, cerchiamo ora di capire come funziona la tomografia sismica. «La metafora che si usa comunemente è quella della radiologia medica» spiega Angelo Camerlenghi, direttore della Sezione di Geofisica dell'Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale di Trieste. «Le onde sismiche sono i nostri raggi X: ci permettono di scoprire cosa c'è dentro, senza dover far nessun taglio.» La sismologia può essere “attiva”, e quindi svolta inducendo vibrazioni nel terreno attraverso macchinari appositi spesso installati su camion, oppure, per analizzare strati molto in profondità, approfittando di grosse detonazioni effettuate dentro a cave o, in casi estremi, di test nucleari. La sismologia “passiva”, invece, è condotta esaminando le onde prodotte da un sisma importante o dalle centinaia di piccoli terremoti che avvengono spesso, anche se non avvertiti dall'uomo.

ONDE SISMICHE: P E S

Le onde sismiche che si diffondono in profondità possono essere di due tipi. Le onde P (primarie), le più veloci e quindi le prime a essere registrate dalle stazioni di rilevazione, fanno oscillare le particelle di materiale che attraversano parallelamente alla loro direzione di propagazione. Così sollecitate, le rocce si comprimono e si dilatano di continuo. Le onde S (secondarie), invece, viaggiano più lentamente e fanno oscillare le particelle di roccia attraversate trasversalmente rispetto alla loro direzione di propagazione. Al contrario di quanto succede per le onde P, le onde S non si propagano

nei fluidi e non provocano variazioni di volume al loro passaggio. «Quando c'è un cambiamento di densità nel terreno, l'onda sismica viene riflessa e quindi torna indietro» spiega Camerlenghi. «Queste onde di ritorno vengono registrate dai cosiddetti stendimenti di geofoni, che sono sostanzialmente dei microfoni posizionati uno dietro l'altro a intervalli regolari sul terreno. Più si vuole andare in profondità con l'indagine, più grande sarà l'area coperta con gli strumenti. Analizzando il tutto con opportuni software si può avere un'immagine virtuale di ciò che sta sottoterra, come fosse un'ecografia.»

MINERALI TRANSFORMERS

Oltre alla validazione basata sul confronto con i dati sismici, i risultati ottenuti con i modelli possono essere confrontati con quelli conseguiti con altri metodi sperimentali. Per esempio, quando possibile, con quelli ottenuti in laboratorio dove si eseguono test nei quali, simulando le condizioni degli strati più interni del pianeta, i minerali vengono sottoposti a temperature e pressioni elevatissime nelle cosiddette celle ad incudine di diamante, per verificarne le possibili trasformazioni, le proprietà e la densità. È stato anche grazie a questo sistema che si è scoperto che i minerali più comuni negli strati superiori del mantello terrestre, quali l'olivina, i pirosseni e i granati, muovendosi verso il mantello inferiore subiscono modificazioni significative, diminuendo di volume e, quindi, aumentando di densità. L'olivina, in particolare, oltre i 400 km di profondità si trasforma in un altro minerale, la wadsleyite, che oltre i 550 km diventa ringwoodite. Oltre i 660 km la ringwoodite si trasforma in un altro minerale ancora, la bridgmanite.

DALLE TRASFORMAZIONI PROFONDE AI TERREMOTI

Se pensate che tutte queste informazioni riguardino un mondo lontano e sommerso che nulla ha a che vedere con quanto avviene sopra la crosta terrestre vi sbagliate. Queste trasformazioni, secondo gli esperti, hanno infatti un effetto diretto sui moti convettivi, quei processi che portano il materiale del mantello a salire verso gli strati superficiali e che sono ritenuti responsabili del movimento delle placche tettoniche. Questi spostamenti hanno modellato la superficie del pianeta a partire dalla Pangea, il continente unico, fino al planisfero come lo conosciamo oggi. E continuano a farlo. «La brusca riduzione del volume di queste rocce a seguito delle transizioni da una fase all'altra (come per esempio nel caso olivina-wadsleyite), e il concomitante rilascio di energia, è in grado di generare fortissime onde sismiche» aggiunge il professor Mauro Precipe. «Si ritiene che questi processi di trasformazione siano all'origine dei terremoti profondi, che avvengono a centinaia di chilometri all'interno della Terra» come quelli che si verificano in Giappone ma anche nel nostro mar Tirreno, a Ovest della Calabria e della Campania dove si registrano frequentemente sismi con ipocentri – i punti nel sottosuolo in cui si originano i terremoti – che possono raggiungere fino a 700 chilometri di profondità.

INTRUSI IN SUPERFICIE

Ma non è tutto. Perché se è vero che non possiamo scendere nel sottosuolo per raccogliere campioni del materiale lì presente, anche lo studio delle rocce presenti sulla crosta può darci molte informazioni su quanto avviene sotto di noi. È questo il caso degli xenoliti, veri e propri “intrusi” rocciosi



© Fotolia/farbled_01

Quando la wadsleyite affiora in superficie ci fornisce molte informazioni utili per lo studio del nostro pianeta

imprigionati in rocce esumate in superficie che, al contrario del materiale che li intrappola, hanno conservato la chimica e la mineralogia originale. Campioni di roccia provenienti anche da diverse decine di chilometri nel sottosuolo ed emersi, per esempio, con le eruzioni vulcaniche, gli xenoliti costituiscono una preziosa testimonianza diretta, e per questo largamente studiata, di come siano fatti gli strati di roccia in aree a noi inaccessibili.

RAPPORTI TRA ISOTOPICI: UNA FIRMA CARATTERISTICA DI AMBIENTI E PERIODI GEOLOGICI

Rimanendo nel campo dell'analisi delle rocce, un altro valido strumento per studiarle deriva dal cosiddetto frazionamento isotopico, ossia dallo studio del rapporto tra gli isotopi – atomi di uno stesso elemento con un diverso numero di neutroni nel nucleo e quindi diversa massa – presenti nei minerali. Le rocce formatesi nel mantello, per esempio, presentano un alto, e peculiare, rapporto isotopico degli elementi elio $^3\text{He}/^4\text{He}$ e neon $^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$. Questi rapporti sono infatti una sorta di firma, caratteristica di particolari ambienti e periodi geologici, che permette ai ricercatori posti davanti a un campione di roccia di rivelarne la provenienza, la formazione, la datazione e, di conseguenza, la storia. Per capire le basi di questa metodica dobbiamo partire da un'evidenza: diverse condizioni ambientali e fisiche, come la pressione e temperatura, e molti processi chimici che coinvolgono reazioni e trasformazioni di minerali, sono in grado di modificare il rapporto tra gli isotopi di uno stesso elemento, come il carbonio, il silicio o l'ossigeno, all'interno di un materiale roccioso. Questo significa che, a seconda del percorso geologico seguito dai materiali, due campioni di uno stesso tipo di roccia potranno presentare, per uno stesso elemento, rapporti isotopici diversi. Un caso è quello che riguarda gli isotopi radioattivi che, essendo instabili, nel corso del tempo tendono a trasformarsi in isotopi stabili. Dal momento che diverse zone del pianeta contengono diversi rapporti tra elementi stabili e instabili, la loro differente evoluzione porterà

a rapporti isotopici caratteristici nelle rocce li formate. Per esempio: rispetto al mantello, la crosta continentale è più ricca in Rubidio che in Stronzio. Il Rubidio (^{87}Rb) che è un elemento radioattivo, tende però a decadere e trasformarsi in un particolare isotopo dello Stronzio, lo ^{87}Sr . Come conseguenza, le rocce della crosta terrestre hanno un preciso, e più alto, rapporto isotopico $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ rispetto a quelle che si sono originate nel mantello.

PLACCHE E TERREMOTI VISTI DA SATELLITE

Per concludere, in un'ellissi ideale, dalla Terra torniamo allo spazio, da dove eravamo partiti con le condriti carbonacee. Perché per studiare la Terra e i suoi movimenti, grazie alla tecnologia, diverse informazioni su ciò che succede nel sottosuolo derivano proprio da lassù. Il gruppo di Karim Aoudia, geofisico dell'International Centre for Theoretical Physics (ICTP) di Trieste indaga ciò che avviene sottoterra con la cosiddetta geodesia spaziale: «È un approccio che studia lo spostamento delle placche tettoniche utilizzando stazioni GPS poste sulla superficie terrestre» spiega lo scienziato. «Ovviamente si osservano gli spostamenti su periodi lunghi, facendo una media in un periodo di 10-15 anni. Questo è importante sia per registrare i movimenti della litosfera dopo i terremoti, sia per monitorare il tutto nei momenti di tranquillità. I dati ottenuti possono così essere raccolti e analizzati. E senza nemmeno andare sul posto.» Mentre il Sar (Synthetic Aperture Radar) è un sistema che, dai satelliti in orbita, effettua una scansione della superficie terrestre. Nel caso di un fenomeno tellurico, le scansioni prese nei diversi momenti possono essere integrate, permettendo così agli studiosi di capire il terremoto stesso e le forze in gioco dovute al movimento delle placche. Quanto resta ancora da scoprire sul nostro pianeta? In realtà moltissime cose. Ma la scienza avanza. In un suo aforisma contenuto nel suo libro *Pensieri spettinati*, Stanisław Jerzy Lec, scrittore e poeta polacco, scrisse: «La Terra, questo puntino sotto l'interrogativo». C'è da scommettere che piano piano, molti segreti di quel puntino ancora così misterioso saranno finalmente svelati. ●

PER APPROFONDIRE

- Doglioni C., *Interno della Terra*, Enciclopedia della scienza e della tecnica, Treccani 2007. link.pearson.it/9CF19F75
- Prencipe M., *Unraveling the Secrets of the Inner Earth*, videoconferenza all'Accademia delle scienze di Torino, 24 giugno 2014. link.pearson.it/EBF6AFE3

Donato Ramani

è giornalista e project manager del Master in comunicazione della scienza Franco Pratico della SISSA di Trieste. Si occupa di formazione in comunicazione scientifica e scrive per diverse testate di scienza e non solo.

