

Penetrare i misteri della Terra

Misteri irrisolti del nostro pianeta potranno essere indagati grazie a particelle elementari sfruttate come sonde quantistiche per le profondità terrestri

di Gianpaolo Bellini, Paolo Strolin e Hiroyuki K.M. Tanaka

Le profondità della Terra hanno da sempre animato il naturale spirito di curiosità della specie umana. Per lungo tempo sono rimaste inaccessibili alla conoscenza, dando vita a credenze e a visioni fantascientifiche come già nel libro *Viaggio al centro della Terra* di Jules Verne (1864). Così dalle origini della cultura umana il «fuoco interno della Terra» è sempre stato presente in miti, religioni, filosofia e scienza, con credenze e interrogativi. Di questo e di altri misteri della Terra si occupa ora la scienza, cercando di «vedere».

Salvo Orlando/PhotoFG/Corbis

IN BREVE

L'interno del nostro pianeta ha ancora molti aspetti da chiarire, nonostante la grande attività e le tante scoperte delle scienze della Terra. Ora un grande aiuto può venire da un ambito di ricerca apparentemente lontano, la fisica delle particelle, grazie a due tecniche sviluppate di recente e basate rispettivamente su muoni e geoneutrini, ovvero due particelle elementari.

I muoni, cugini più massicci degli elettroni, prodotti dall'impatto dei raggi cosmici con l'atmosfera, permettono di radiografare strutture interne dei vulcani altrimenti inaccessibili.

I geoneutrini, antineutrini prodotti dal decadimento di elementi radioattivi terrestri, possono fornire agli scienziati informazioni su composizione, origine ed evoluzione della Terra.

Calore profondo.

Un evento parossistico dell'Etna avvenuto nel 2013. Le eruzioni vulcaniche sono uno dei fenomeni innescati dal calore interno del nostro pianeta.

Il 14 novembre dello scorso anno il «Japan Times» ha pubblicato un articolo con il titolo: *Italia e Giappone promuovono la cooperazione nelle scienze della Terra usando la fisica*. Si riferiva alla firma di un accordo tra Istituto nazionale di fisica nucleare (INFN) e Istituto nazionale di geofisica e vulcanologia (INGV) con l'Earthquake Research Institute (ERI) dell'Università di Tokyo per «alleare» forze e competenze nell'indagare l'interno dei vulcani e le profondità della Terra sfruttando nuove possibilità offerte dalle particelle elementari, in particolare da muoni e neutrini.

L'alleanza ha un duplice aspetto: unisce Italia e Giappone, entrambi soggetti a terremoti ed eruzioni vulcaniche e all'avanguardia nelle ricerche in questi ambiti; unisce scienze della Terra e fisica delle particelle elementari nello studio di fenomeni che interessano tutta la popolazione. Si ritrova così anche lo spirito di «unità della scienza», che è all'origine della nostra cultura e che tende a perdersi con l'inevitabile divaricarsi nelle specializzazioni.

La firma dell'accordo è avvenuta a conclusione del convegno Muographers 2014 ospitato dall'Ambasciata dell'Italia a Tokyo, in cui scienziati italiani e giapponesi hanno discusso della «muografia» di vulcani e delle potenzialità dei «geoneutrini», vettori di informazioni sul calore che si sprigiona nelle profondità della Terra e sui fenomeni a esso collegati. Sono nuove sfide scientifiche che richiedono nuove alleanze e sinergie.

La scienza esplora il cosmo, ma anche l'interno della Terra è ancora denso di misteri. Qual è la sorgente di energia, ossia calore, che alimenta il fuoco interno del nostro pianeta? È solo calore primordiale, emanato da quel che resta dal patrimonio energetico avuto in dote dalla Terra con la sua formazione, avvenuta oltre 4 miliardi di anni fa? I geoneutrini possono dirci qualcosa?

Il calore interno del pianeta alimenta i moti convettivi della materia fluida nel mantello terrestre sottostante alla crosta, come la caldaia fa circolare l'acqua in un impianto di termosifone. Questo fenomeno influisce sulla tettonica delle placche, con i conseguenti terremoti e i fenomeni vulcanici. Inoltre le eruzioni dipendono dalle strade che magma e materiale surriscaldato trovano per uscire. È quindi anche importante individuare queste strade nella struttura interna dei vulcani.

Gli interrogativi sono dunque pratici, non solo speculativi. Sebbene il bilancio energetico della Terra sia dominato dal calore assorbito dal Sole (circa il 99,97 per cento), il calore emanato dall'interno dà vita propria al nostro pianeta, differenziandolo dagli altri e fornendo energia motrice a importanti, talvolta devastanti, fenomeni che influiscono su noi esseri viventi sulla superficie terrestre. Vediamo che cosa muoni e geoneutrini possono fare per noi.

Muografia di vulcani

I muoni, indicati anche con la lettera greca μ , sono fratelli maggiori degli elettroni, con massa circa 200 volte più grande. Muoni di alta energia sono prodotti di continuo nelle interazioni di particelle di altissima energia provenienti dal cosmo (i cosiddetti «raggi cosmici») con particelle dell'alta atmosfera terrestre.

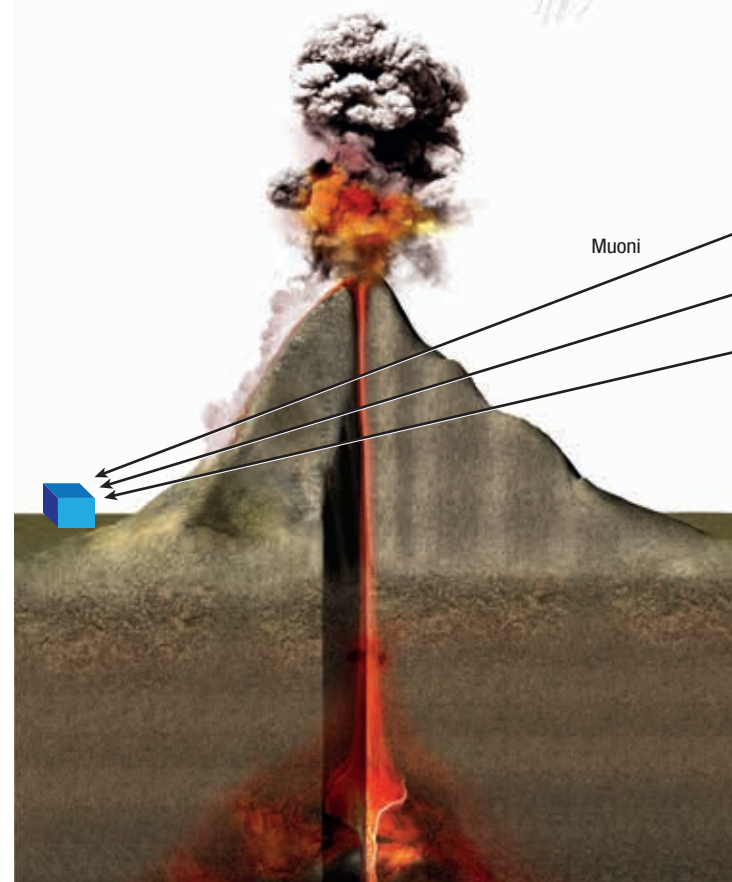
Nella radiografia, la trasmissione dei raggi X nell'attraversare il corpo umano mostra le ombre degli organi interni di maggiore spessore o densità, per esempio ossa, e la presenza di cavità, per esempio carie dentali. I muoni di alta energia hanno un'interazione più debole con la materia rispetto ai raggi X e un forte potere di penetrazione, ma analoghe manifestazioni nella trasmissione. Possono essere usati per esplorare mediante muografie strutture interne su dimensioni molto più grandi di quelle del corpo umano.

L'idea di usare i muoni per rivelare strutture interne altrimenti

Gianpaolo Bellini è un fisico sperimentale nel campo delle particelle elementari e delle astroparticelle, ha lavorato nei principali laboratori del mondo, ottenendo importanti scoperte. È scienziato emerito dell'Istituto nazionale di fisica nucleare e membro dell'Istituto Lombardo Accademia di Scienze e Lettere.

Paolo Strolin è professore emerito all'Università degli Studi di Napoli «Federico II» e Istituto nazionale di fisica nucleare. Ha condotto importanti esperimenti in fisica del neutrino e sviluppi in muografia di vulcani. Presiede l'Associazione «Scienza e Scuola».

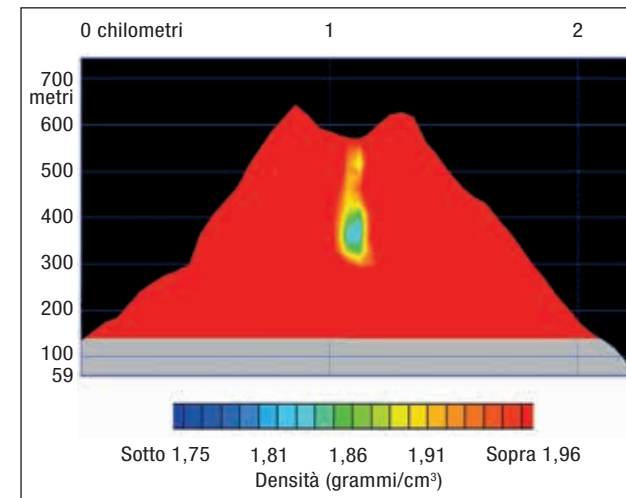
Hirokyu K. M. Tanaka è professore di geofisica con particelle di alta energia all'Università di Tokyo. È un pioniere nell'applicazione della fisica nucleare e della fisica delle particelle per osservazioni della Terra.



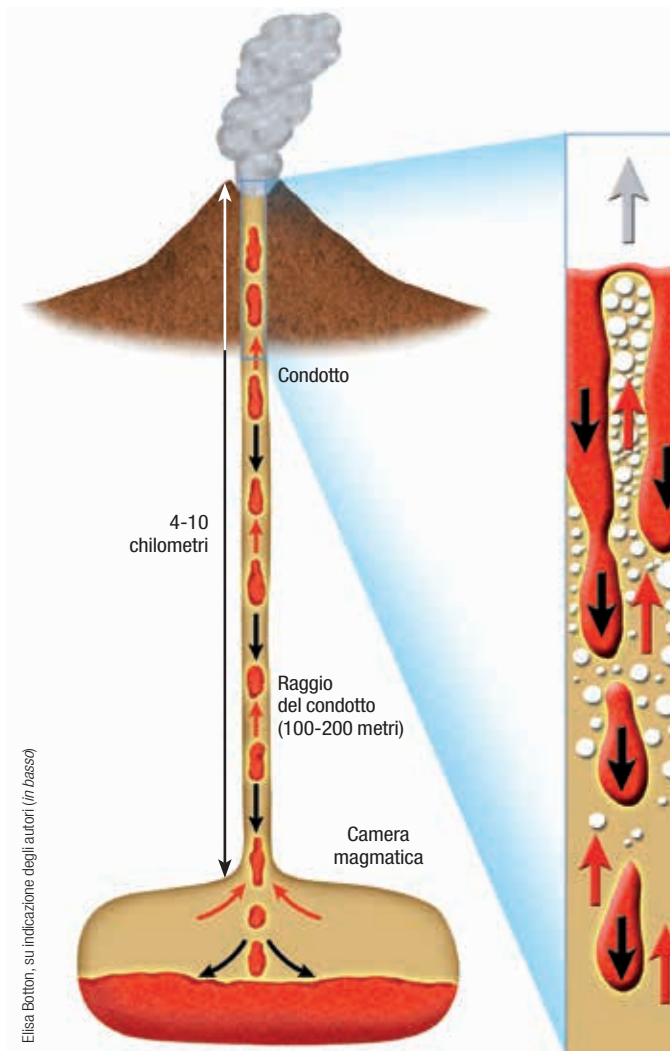
inaccessibili fu introdotta in archeologia verso il 1970 da Luis Álvarez (premio Nobel nel 1968 per contributi alla fisica delle particelle elementari) per la ricerca di camere mortuarie ignote nella piramide di Chefrén in Egitto. La muografia fu fatta rivelando i muoni passati attraverso la piramide, proiettando all'indietro la loro traiettoria e studiando la loro trasmissione (si veda il box a p. 62).

Ma se i muoni erano usati per studiare le piramidi, perché non usarli anche per i vulcani? Certo, in questo caso la spessore di materia da attraversare è molto più grande: fra i muoni prodotti dai raggi cosmici, solo quelli di energia più elevata, che sono anche i più rari, possono farlo. Così è nata l'idea di usare la muografia per ottenere immagini della struttura interna superiore dei vulcani,

Claus Lunau/SPY/Contrasto (elaborazione «Le Scienze»)



L'occhio dei muoni. Immagine muografica del vulcano giapponese Satsuma-Iwojima. Sotto il fondo del cratere è visibile una regione a bassa densità, grande e poco profonda, che indica la presenza di magma in degassaggio con alta percentuale di bolle. Qui sotto, il modello convettivo di magma in un condotto a bassa profondità. A fronte, schema di una muografia vulcanica.



Elisa Botton, su indicazione degli autori (in basso)

evidenziando per esempio zone a bassa densità o condotti. Questa capacità di fornire immagini relativamente dirette e accurate è un passo avanti nelle tecniche di studio dei fenomeni vulcanici. Poiché i raggi cosmici investono la Terra da tutte le direzioni, ci sono anche muoni quasi orizzontali alla superficie che possono essere sfruttati per muografie di strutture emergenti dalla superficie, come l'edificio di un vulcano, tracciando all'indietro le traiettorie dei muoni attraverso quelle strutture (si veda l'immagine in alto in questa pagina).

La muografia dei vulcani ha avuto uno sviluppo progressivo. Nel 1995, cioè 25 anni dopo Álvarez, il rapporto su una ricerca sperimentale fatta in Giappone da Kanetada Nagamine dell'Università di Tokyo concludeva che «è stato dimostrato che muoni quasi orizzontali, prodotti dai raggi cosmici, possono essere usati per esplorare l'interno di una gigantesca struttura geofisica, come la parte superiore di un vulcano». La prima importante prova sperimentale della muografia ha avuto come oggetto la parte sommitale del monte Asama, in Giappone. Questa muografia è stata effettuata nel 2007 da uno degli autori (Tanaka) in collaborazione con Kimio Niwa, dell'Università di Nagoya, sfruttando per la rivelazione dei muoni gli sviluppi della tecnica delle «emulsioni fotografiche nucleari» condotti per OPERA, un esperimento sulla fisica dei neutrini installato nel laboratorio sotterraneo del Gran Sasso dell'INFN.

La muografia non può evidenziare la struttura profonda di un vulcano, come una camera magmatica, ma solo parti relativamente poco profonde. Di conseguenza non dà informazioni su quando può avvenire un'eruzione, ma dà informazioni utili per capire come può manifestarsi. In particolare le immagini muografiche possono evidenziare zone a bassa densità sotto un deposito di magma solidificato e indicare possibili vie d'uscita per il magma.

Un esempio dei vantaggi per la comprensione della dinamica eruttiva è stato fornito da uno di noi (Tanaka) con la muografia del vulcano Satsuma-Iwojima, in Giappone, che scarica di continuo grandi quantità di gas vulcanici senza significativa uscita di magma. L'immagine muografica (in alto a sinistra in questa pagina) ha evidenziato una regione a bassa densità nel punto più alto del condotto magmatico, in accordo con un modello convettivo che indica la presenza di magma in degassaggio. Nel modello convettivo di Kohei Kazahaya, Hiroshi Shinohara, Genji Saito, tutti e tre della Geological Survey of Japan, un condotto di magma è collegato a una camera magmatica profonda (si veda l'illustrazione qui a fianco). Il magma è spinto verso l'alto da una componente gassosa. Nella parte superiore del condotto il gas si libera dal magma ed esce dal vulcano. Non più spinto dalla componente gassosa, il magma affonda, e quindi non ostruisce il condotto. Nello stesso tempo, nuovo magma è pompato dal gas e il ciclo continua. Lo stesso gruppo ha effettuato altre indagini muografiche di vulcani giapponesi. Citiamo inoltre le indagini di Dominique Gilbert, dell'Università di Rennes, con la collaborazione DIAPHANE sul vulcano La Soufrière a Guadalupa, nelle Antille francesi.

Attualmente sono in corso esperimenti per capire a fondo le potenzialità della muografia nello studio dei vulcani e progredire nel suo sviluppo per estenderne il campo di applicazione. Questo richiede una nuova generazione di rivelatori con migliori prestazioni, e gli addetti ai lavori procedono secondo due direzioni. Una è lo studio dello sviluppo temporale di eruzioni vulcaniche, dove lo spessore di roccia penetrato dai muoni resti limitato a circa mezzo chilometro. La necessaria maggiore velocità nell'accumulare dati richiede che sia intercettato un maggior flusso di muoni, e questo richiede a sua volta un aumento dell'area coperta dagli

Il fuoco interno della Terra

L'idea di un «fuoco interno della Terra» è già presente nell'antica mitologia greca, nel cui mondo sotterraneo dei morti, l'Ade, c'erano cinque fiumi: Stige, Lete, Cocito, Acheronte e Piriflegetonte (ossia ardente di fuoco). Nel IV secolo a.C. Platone collega il vulcanismo al Piriflegetonte: «Avvolto dunque più volte intorno alla Terra, s'immette sottoterra più in basso del Tartaro; questo fiume, dunque, è quello che denominano Piriflegetonte, cui rivoli sono anche gli spruzzi di lava che affiorano dove capita sulla terra» (*Fedone*, 32-113b). Il Tartaro citato da Platone è il profondo luogo dei dannati da Zeus, «tanto lontano dall'Ade quanto la terra dal cielo» (*Omero, Iliade*, VIII-13).

Il fuoco interno della Terra entra nella scienza nel XVII secolo con Athanasius Kircher, di qualche decennio posteriore a Galileo Galilei. Il suo genio eclettico spaziò dall'egittologia, alla geologia, alla medicina e non solo. Osservazioni sui vulcani fecero postulare a Kircher l'esistenza di un «fuoco» all'interno della Terra, che alimenta il vulcanismo attraverso una serie di canali e camere infuocate intermedie. I «monti vulcani» sono considerati «sfiatatoi» del fuoco interno del nostro pianeta, come descrive nella sua opera *Mundus subterraneus* del 1664.



Il mondo di Kircher. Il sistema di canali ignei sotterranei, di cui i vulcani sono come sfiatatoi, in *Mundus subterraneus*.

apparati sperimentali che rivelano i muoni (finora dell'ordine di un metro quadrato). Inoltre si cerca di aumentare la definizione delle immagini muografiche, aumentando la precisione nel tracciamento all'indietro delle traiettorie di queste particelle nel vulcano.

Un'altra direzione è l'estensione delle indagini a vulcani che richiedono muoni penetranti attraverso spessori di roccia più grandi, quindi di maggior energia. Il loro flusso si affievolisce con l'energia (come dicevamo i muoni più energetici sono anche i più rari), e i falsi segnali provocati da effetti spuri (il cosiddetto «fondo») diventano via via dominanti. L'effetto è simile a quello di una persona che cerca di captare un'esile voce in una stanza piena di rumori. In questa situazione non basta disporre di rivelatori che coprano un'area più grande, ma bisogna ridurre anche i segnali spuri. Il vulcano francese Puy de Dôme è stato oggetto di misurazioni di prova su spessori di roccia tra 1 e 1,5 chilometri, in cui sono stati usati prototipi incompleti rispetto agli apparati previsti dalle collaborazioni MU-RAY e TOMUVOL, condotte rispettivamente da Giulio Saracino, dell'Università di Napoli «Federico II» e dell'INFN, e Cristina Cârloganu del francese Centre national de la recherche scientifique (CNRS). In entrambi i casi l'analisi ha mostrato che il fondo è troppo elevato. Il risultato è in accordo con altre indicazioni, e mostra che è necessario un ulteriore sforzo per ridurre gli effetti spuri. Ecco perché è in fase di sviluppo una nuova generazione di apparati sperimentali con area più ampia e nuove metodologie per la riduzione del rumore di fondo.

La diffusione della muografia richiede anche sviluppi nella trattazione, comprensione e interpretazione dei dati sperimentali ricavati da una comunità internazionale di scienziati. E la collaborazione tra MU-RAY e TOMUVOL è un passo in questa direzione.

Complessivamente il futuro della muografia di vulcani dipenderà da uno sforzo coerente e sinergico di una forte comunità internazionale di fisici delle particelle elementari e di geofisici, al fine di sfruttarne in pieno il potenziale e portarla da campo di ricerca pionieristico a strumento di indagine geofisica largamente usato. No-

Lo studio delle particelle elementari chiamate geoneutrini offre nuove possibilità per rispondere a domande su composizione, origine ed evoluzione del nostro pianeta

tiamo infine che i progressi nella muografia di vulcani hanno stimolato applicazioni in altri campi. Un esempio è un progetto della NASA per la muografia di asteroidi nel sistema solare con dimensioni fino a un chilometro. Si basa sullo studio della trasmissione dei muoni prodotti in strati superficiali dell'asteroide dall'impatto di particelle di alta energia provenienti dal cosmo.

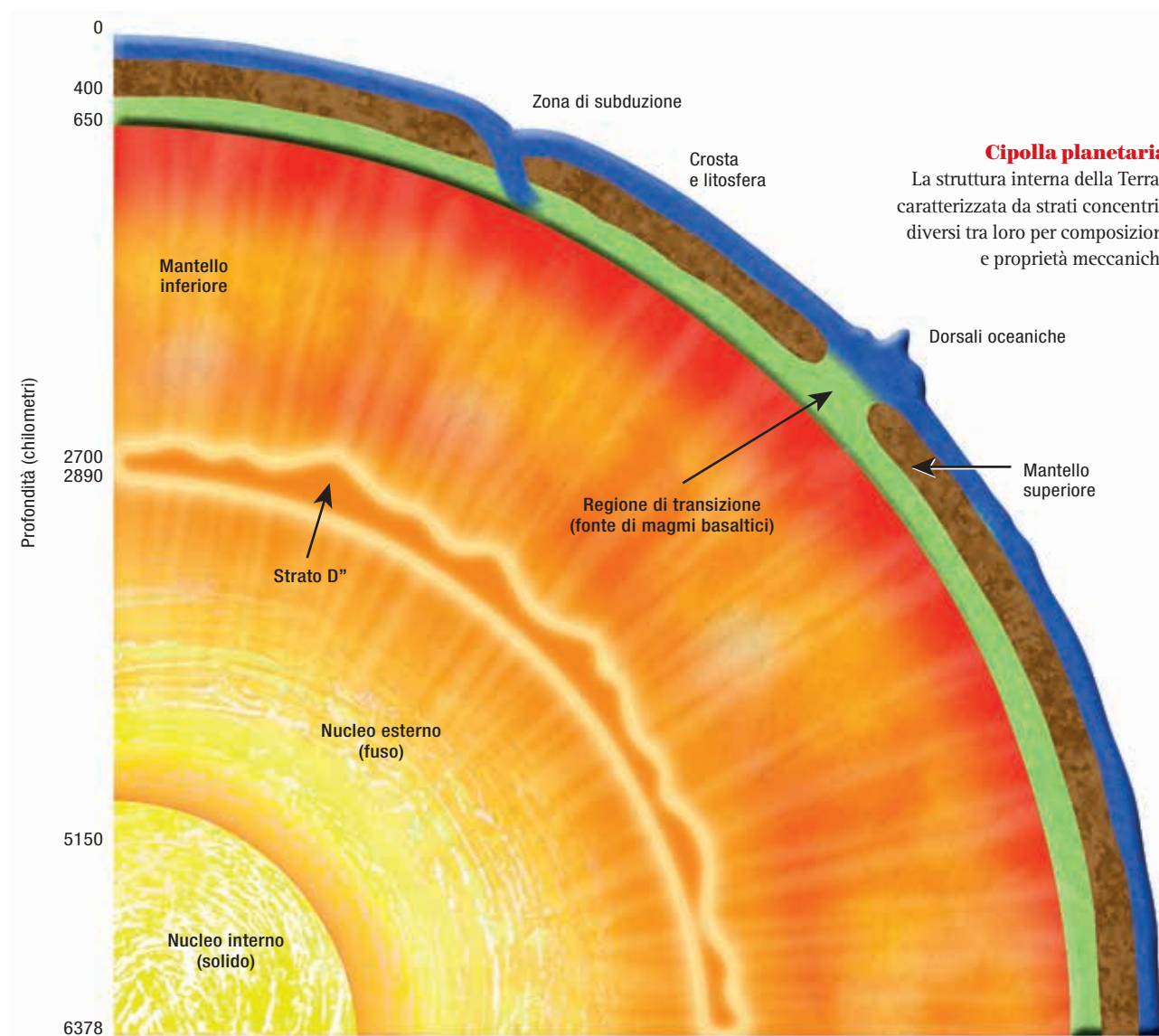
I geoneutrini

All'interno del nostro pianeta le temperature raggiungono livelli di qualche migliaio di gradi, e il nostro pianeta invia nello spazio, attraverso la sua superficie, una grande quantità di calore. Una parte consistente di questo calore è prodotta dai decadimenti radioattivi presenti in notevole quantità all'interno della Terra.

Da dove viene questa informazione? Come facciamo a indagare a migliaia di chilometri sotto la crosta terrestre? Come vedremo, metodi geofisici e geochemici possono fornirci informazioni, ma rileviamo la presenza di elementi radioattivi grazie ai neutrini che provengono dall'interno della Terra. I neutrini, particelle elementari senza carica e di massa praticamente trascurabile, agiscono come formidabili sonde, dato che sono capaci di attraversare grandi quantità di materia (addirittura tutto l'universo) senza subire alterazioni, perché non interagiscono con la materia.

I nuclei atomici instabili che decadono, cioè si trasformano in altri nuclei di massa minore rispetto a quella di partenza, nel farlo emettono più precisamente le antiparticelle dei neutrini, gli an-

Corbis



Cipolla planetaria. La struttura interna della Terra è caratterizzata da strati concentrici diversi tra loro per composizione e proprietà meccaniche.

tineutrini, liberando energia corrispondente alla diminuzione di massa (secondo la relazione di equivalenza fra massa ed energia di Einstein). Questa energia si manifesta sotto forma di calore. Poiché le reazioni di decadimento sono conosciute, rivelando gli antineutrini emessi dalla Terra è possibile valutare quanto del calore terrestre, il calore emesso dalla Terra nell'unità di tempo, sia dovuto alla radioattività. Questi antineutrini terrestri sono detti «geoneutrini».

La Terra è come una grande cipolla, composta da strati concentrici che differiscono fra loro per composizione o per proprietà meccaniche, separati in qualche caso da una regione di transizione (si veda l'illustrazione in alto). Il nucleo interno, al centro della Terra, è grande circa come la Luna, è costituito da ferro e nichel ed è solido, malgrado l'altissima temperatura, a causa dell'enorme pressione a cui è sottoposto. È circondato da un nucleo esterno di uguale composizione e spesso circa 2200 chilometri, non più solido ma viscoso. Ruotando intorno al nucleo interno, il nucleo esterno si comporta come una grande dinamo (geo-dinamo).

Il nucleo è circondato dall'enorme mantello, viscoso e di materia silicea con elevata presenza di magnesio e in quantità minore di ferro. Il mantello inferiore è spesso circa 3100 chilometri, mostra gradienti elevati di temperatura, forse dovuti anche a giacimenti radioattivi di torio e uranio, che producono movimenti di grandi quantità di materia, i moti convettivi, che a loro volta causano i movimenti delle placche tettoniche, e quindi terremoti, e fenomeni vulcanici. Dopo un altro strato di soli 250 chilometri

che rappresenta il mantello superiore c'è la crosta: di gran lunga lo strato più sottile, composto di materia solida, su cui viviamo. Il suo spessore è di soli 10 chilometri circa per la crosta oceanica e da 30 a 70 chilometri per quella continentale.

Ma ancora una volta potreste chiedervi come facciamo a ottenere queste informazioni sulla struttura della Terra. Le metodiche si basano sullo studio delle onde sismiche e su analisi geochemiche. Modo di propagarsi, comportamento, direzionalità e velocità delle onde sismiche ci dicono se la materia attraversata è liquida o solida e qual è la sua densità, per esempio i movimenti sussultori non si propagano in materia non solida. Le analisi geochemiche sono limitate per lo più alla crosta e sono effettuate su materiale ottenuto con trivellazioni che penetrano il sottosuolo per qualche chilometro, quindi non arrivano al mantello. La più profonda è una trivellazione di 12 chilometri nella penisola di Kola, in Russia.

Qualche informazione sul mantello è fornita dalle rocce espulse nelle eruzioni vulcaniche, che però possono aver subito alterazioni e sono abbastanza limitate al mantello superiore. Inoltre, ipotizzando che la materia che forma il sistema solare sia uniforme, si studia la composizione delle «meteoriti condritiche», che contengono piccole sfere, chiamate «condruli», della stessa età della Terra, circa 4,6 miliardi di anni. Questi condruli mantengono la composizione originaria del sistema solare, e quindi della Terra dei primordi, essendosi raffreddati rapidamente subito dopo la formazione.

Il calore terrestre è valutato misurando il gradiente di tempe-

Elisa Botton, su indicazione degli autori

Dallo spessore della roccia alle camere nascoste

L'idea di sfruttare i muoni prodotti dai raggi cosmici è stata applicata per la prima volta circa sessant'anni fa da E.P. George, il quale voleva valutare lo spessore di roccia sopra un tunnel dell'impianto idroelettrico nella Snowy Mountain, in Australia. A questo scopo George voleva misurare la riduzione del flusso dei muoni dopo che queste particelle avevano attraversato la roccia. L'apparato sperimentale era costituito da rivelatori di particelle chiamati «contatori Geiger», la cui risoluzione angolare però era inadeguata a fornire un'immagine di qualsiasi struttura all'interno della roccia sovrastante.

Questa tecnica è stata promossa a «muografia» dal fisico statunitense Luis Alvarez, che nel 1968 ha ricevuto il Nobel per le sue scoperte in fisica delle particelle, con la ricerca di una camera nascosta nella piramide di Chefredren a Giza, in Egitto. L'articolo pubblicato su «Science» nel 1970 dice: «La novità principale dei rivelatori di raggi cosmici usati è la loro capacità di misurare con grande precisione gli angoli di arrivo dei muoni penetranti da raggi co-

smici, su una vasta area sensibile [...] Solo dopo l'invenzione delle «camere a scintilla» con lettura digitale un tale loro uso è stato considerato come una possibilità reale».

Alvarez si era chiesto come mai la piramide di Chefredren avesse solo una camera di sepoltura (la cosiddetta camera di Belzoni) mentre la piramide vicina di suo padre Cheope aveva una struttura interna più complessa, tra cui una camera del Re e una della Regina. I suoi calcoli mostravano che una camera nascosta sarebbe stata vista da muoni prodotti da raggi cosmici, osservati in un rivelatore costituito di camere a scintilla e situato nella camera di Belzoni, allo stesso modo in cui una carie dentaria è evidenziata da una zona nera in un'immagine ai raggi X. Nel 1966 iniziò un progetto congiunto tra Stati Uniti e Repubblica Araba Unita, la denominazione di allora dell'Egitto. Anche se non fu trovata alcuna camera nascosta, questo lavoro pionieristico ha aperto la strada all'applicazione della muografia in vari campi.

ratura, ovvero la variazione, lungo i carotaggi. Questa valutazione converge su un valore di 47 terawatt (10^{12} watt). Altri approcci portano invece a risultati diversi. Ma quanto di questo calore è prodotto dai decadimenti radioattivi? Rispondere a questa domanda è uno degli obiettivi della ricerca sui geoneutrini.

Se la stragrande maggioranza dei neutrini può attraversare grandi masse di materia senza esserne disturbata, come facciamo rilevare queste particelle? Innanzitutto, i rivelatori devono avere una grande massa per avere una probabilità non trascurabile di interagire con i neutrini. Inoltre, poiché comunque il numero di interazioni è assai basso, è necessario che non ci siano altre particelle che possano simulare e mascherare le poche interazioni dei neutrini (il cosiddetto «fondo»). Per ridurre il fondo, i rivelatori devono essere installati in un laboratorio sotterraneo, in modo che siano schermati dalle rocce sovrastanti, che assorbono gli sciami di particelle prodotte dall'urto dei raggi cosmici con l'atmosfera terrestre. I rivelatori devono anche essere schermati dalle radiazioni emesse dai nuclei radioattivi nelle rocce in cui sono state scavate le sale sperimentali, dai materiali che ci sono in queste sale e da quelli usati per costruire il rivelatore. Ma per la «radio-purezza» del rivelatore è ancora più importante che sia soppressa al massimo la radioattività naturale nella parte in cui le interazioni delle particelle possono essere rilevate.

Finora solo due esperimenti sono stati capaci di studiare i geoneutrini: Borexino, nei Laboratori nazionali del Gran Sasso dell'INFN, in Italia; e KamLAND, nella miniera di Kamioka-Mozumi, in Giappone. I neutrini sono rivelati tramite la flebile luce generata in uno speciale liquido detto «scintillatore» dalle particelle elettricamente cariche prodotte nei loro urti con la materia da cui è costituito.

In realtà Borexino è un esperimento ideato per lo studio dei neutrini prodotti nelle reazioni nucleari all'interno del Sole, di energia molto più bassa rispetto a quella dei geoneutrini. Questo rivelatore è unico al mondo per la radio-purezza raggiunta, che costituisce un record assoluto, e il volume dello scintillatore liquido è di circa 300 metri cubi. Lo scopo originario di KamLAND è invece lo studio dei neutrini mediante antineutrini prodotti dai reattori nucleari, che in media hanno energie superiori a quelle dei geo-neutrini. Il volume dello scintillatore è di circa 1000 metri cubi, ma la radio-purezza è molto più bassa di quella di Borexino.

C'è da sottolineare che un importante fondo che disturba le misurazioni di geoneutrini è dovuto agli antineutrini provenienti dai reattori nucleari installati in tutto il mondo, ma soprattutto nelle zone più vicine al sito dove è installato il rivelatore. Per questo motivo Borexino è decisamente favorito rispetto a KamLAND, che è circondato dai numerosi reattori giapponesi.

Per avere un'idea di quanti siano i geoneutrini, è utile fare un confronto con quelli solari. Il Sole investe la Terra con circa 60 miliardi di neutrini al secondo per centimetro quadrato. Di questa enorme quantità di neutrini solari Borexino osserva solo circa 45 interazioni al giorno, mentre rileva un'interazione di geoneutrini ogni due mesi circa, un numero incredibilmente piccolo, ottenuto grazie alla sensibilità elevata del rivelatore.

La scoperta dei geoneutrini apre nuove importanti possibilità per esplorare le proprietà dell'interno della Terra, contribuendo a rispondere a domande su composizione, origine ed evoluzione del pianeta. Sappiamo che nella crosta terrestre ci sono nuclei radioattivi. Per ragioni di affinità chimica potrebbero esserci anche nel mantello (non nel nucleo). La prima domanda riguarda l'effettiva presenza di nuclei radioattivi anche nel mantello e quindi il contributo dei loro decadimenti al calore globale terrestre.

Per capire meglio l'origine della Terra e del sistema solare, è poi importante conoscere il rapporto fra le quantità di torio e uranio radioattivi che si trovano nella materia terrestre e confrontarlo con quello misurato nelle meteoriti condritiche.

Infine si cerca di stabilire la validità dei modelli terrestri (detti *bulk silicate Earth*, BSE) elaborati dai geofisici, che si articolano in tre diversi approcci: cosmo-chimico, che assume come base per la composizione chimica della materia terrestre quella delle meteoriti; geochimico, che assume anch'esso la composizione chimica delle meteoriti condritiche, ma tiene conto anche della composizione delle rocce provenienti dal mantello; geodinamico, che tiene conto dell'energia dei moti convettivi del mantello.

Per rispondere alla domanda sulla radioattività nel mantello, oltre alla misurazione del flusso totale di geoneutrini, bisogna conoscere anche il flusso che proviene dalla crosta vicina e da quella lontana rispetto al sito del rivelatore. A questo scopo gli scienziati analizzano le rocce del sito e studiano la struttura geologica della crosta conoscendo le rocce che la compongono. Nel complesso, i dati di Borexino e KamLAND hanno dato un'indicazio-



La piramide di Chefredren è alta circa 140 metri. Il rivelatore di muoni progettato da Alvarez era situato nella camera di Belzoni, e rilevava muoni provenienti dall'alto attraverso uno spessore di materiale mediamente dell'ordine di 100 metri.

ne positiva di radioattività dal mantello, ma con un'incertezza ancora rilevante.

Il contributo dei decadimenti radioattivi al calore terrestre può essere dedotto dalla radioattività del mantello e dal contributo della crosta. Purtroppo le incertezze sulla distribuzione degli elementi radioattivi nel mantello – distribuzione omogenea oppure concentrazione nella parte a ridosso del nucleo – producono un margine di incertezza ancora grande in questa valutazione.

Il rapporto dei segnali provenienti rispettivamente da uranio e torio nelle meteoriti condritiche è pari a 3. Lo stesso rapporto risulta di 2,5 in base allo studio della distribuzione di energia dei geo-neutrini effettuato da Borexino. Tenuto conto dell'incertezza sperimentale esso è compatibile con il rapporto condritico, come lo è la misura effettuata da KamLAND, sebbene affetta da una maggiore incertezza sperimentale. Infine i risultati ottenuti fino a oggi sembrano favorire l'approccio biochimico fra i modelli BSE.

È evidente che per ottenere risultati più robusti occorre disporre di un maggior numero di interazioni di geoneutrini. Borexino e KamLAND continuano a raccogliere dati. Ma altri esperimenti sono in preparazione o in progetto: SNO+, nel laboratorio sotterraneo di Sudbury, in Canada, e soprattutto HanoHano, da immergere nelle profondità dell'Oceano Pacifico presso le Hawaii. Quest'ultimo esperimento è particolarmente importante e ambizioso perché dovrebbe essere installato in una zona della crosta oceanica sopra cui il 70 per cento del flusso di geoneutrini proviene dal mantello.

Lo studio dei geoneutrini ha aperto un nuovo campo di ricerca sulla struttura della Terra. I risultati ottenuti fino a oggi sono solo l'inizio. Nei prossimi anni saranno disponibili nuovi dati prodotti da Borexino, KamLAND e SNO+, e saranno dati che potrebbero risolvere qualcuno dei misteri che ancora aleggiavano in questo campo. Di sicuro una rete di rivelatori capaci di produrre una mappa mondiale del flusso di neutrini potrebbe dare informazioni utili sullo spostamento del calore nel mantello e quindi sui movimenti convettivi al suo interno, che come già accennato sono la causa dei movimenti delle placche tettoniche e dei fenomeni vulcanici. Tuttavia va anche specificato che questi rivelatori sono costosi, e necessitano di un notevole sforzo di fisici e ingegneri. Soltanto interessi congiunti con scopi di ricaduta sulla vita delle persone potrebbero dare la spinta necessaria alla costruzione di una rete di questo tipo.

Sonde quantistiche

L'indagine sulle caratteristiche dell'interno della Terra è stata un'area di ricerca particolarmente attiva, e nel corso del XX secolo ha usato sonde classiche come le onde sismiche. La tomografia sismica ha rivelato, per esempio, che la Terra ha una struttura a strati composta da nucleo, mantello e crosta.

Procedendo nel XXI secolo, la ricerca potrebbe espandersi usando sonde quantistiche, muoni da raggi cosmici e geoneutrini, e svelare proprietà altrimenti inaccessibili. La muografia è nata oltre quarant'anni fa con un'applicazione in archeologia, e di recente ha registrato un notevole progresso in vulcanologia, sfruttando tecniche sperimentali sviluppate per la fisica delle particelle elementari. Sempre di recente sono stati scoperti i geoneutrini, grazie a esperimenti sotterranei in Italia e in Giappone progettati per indagini in fisica e astrofisica, anch'esse collegate alle particelle elementari. Il potenziale di queste sonde quantistiche come strumenti per le scienze della Terra inizia a essere riconosciuto.

Circa tre millenni di storia umana dopo il Piriflegetonte dell'antica Grecia (*si veda il box a p. 60*), vi sono ancora molti misteri irrisolti che riguardano il nostro pianeta e il suo fuoco interiore. Potremmo ottenere grandi scoperte con muografia e geoneutrini. Entrambi implicano ingegno sperimentale e progetti dedicati, che possono diventare realtà solo attraverso alleanze tra fisici delle particelle elementari e scienziati della Terra.

Lo spirito di unità della scienza ha caratterizzato l'opera di grandi scienziati attraverso i millenni. Tuttavia il progresso scientifico ha richiesto una specializzazione in discipline, che domina solo da circa un secolo. Il nuovo approccio necessario per esplorare l'interno della Terra con sonde quantistiche, con alleanze tra i diversi campi di ricerca, è quindi coerente con le radici e la storia della cultura scientifica. ■

PER APPROFONDIRE

Search for Hidden Chambers in the Pyramids. Alvarez L.W. e altri, in «Science» Vol. 167, n. 3919, pp. 832-839, 6 febbraio 1970.

Introductory Muon Science. Nagamine K., Cambridge University Press, 2007.

Eyeing the Earth with neutrinos. Bellini G. e Ludhova L., in «Physics World», Vol. 25 n. 3 p. 44-48, marzo 2012.

Geo-neutrinos. Bellini G., Ianni A., Ludhova L., Mantovani F., McDonough W.G., in «Progress in Particle and Nuclear Physics», Vol. 73, pp. 1-34, novembre 2013.