

LA SCOPERTA DEI GEONEUTRINI

decadimenti radioattivi e produzione del calore terrestre

di Gianpaolo Bellini*

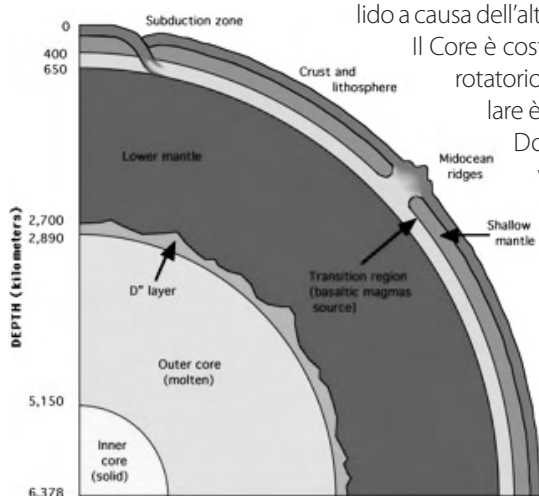
Nel Laboratorio sotterraneo del Gran Sasso un gruppo di fisici impegnati nell'esperimento Borexino, guidato dall'autore, per la prima volta al mondo ha «visto» delle particelle, i geoneutrini, provenienti direttamente dal centro della Terra. Una scoperta che rivela una forte attività di decadimento radioattivo all'interno della Terra e apre una nuova era nello studio dei meccanismi che governano l'interno del nostro pianeta. Perché la temperatura aumenta se dalla superficie terrestre andiamo verso l'interno della Terra? A un primo livello la risposta è semplice: all'interno della Terra esiste una enorme quantità di energia termica, che non sembra esaurirsi. Ma qual è l'origine di questa energia? L'articolo espone varie ipotesi, tutte basate sulla presenza di radioattività all'interno della Terra, e i primi risultati dell'esperimento Borexino che ha dimostrato l'esistenza dei geoneutrini, riuscendo a evidenziarne il segnale con un'affidabilità superiore al 99,997 per cento.

La Terra nasconde al proprio interno un'enorme quantità di energia termica: da 31 a 44 TWatt (Tera = 10^{12} = mille miliardi). Ma qual è l'origine di questa energia, che non sembra esaurirsi? La soluzione di questo interrogativo è stata cercata da un gruppo di fisici mediante un esperimento installato nel Laboratorio sotterraneo del Gran Sasso. Per comprendere meglio di cosa si tratti, bisogna fare un passo indietro e iniziare dalla struttura della Terra.

La struttura della Terra

La Terra è costituita da sfere concentriche. Iniziando dall'interno, troviamo prima di tutto il «Core Interno» formato da un nocciolo solido, di circa 750 Km di raggio (più o meno le dimensioni della Luna), il quale a sua volta è circondato dal «Core Esterno», liquido, avente un raggio di circa 2400 Km. La temperatura del Core complessivo è molto elevata, fino a 5800 K (K = gradi Kelvin):

* Ordinario di Fisica Nucleare e Subnucleare all'Università degli Studi di Milano.



Schema della struttura della Terra

quindi esso dovrebbe essere tutto liquido; tuttavia il nocciolo più interno è solido a causa dell'altissima pressione (~330 MPa [Mega Pascal=10⁶ Pascal]).

Il Core è costituito da una lega metallica di Nichel e Ferro: il moto rotatorio di questa lega conduttrice nel campo magnetico solare è forse all'origine dal campo magnetico terrestre.

Dopo un piccolo strato intermedio di transizione, troviamo intorno al Core il Mantello, di circa 2250 Km di spessore, viscoso, sul quale galleggiano le placche tettoniche. Le differenze di temperatura fra i vari punti del Mantello provocano dei moti convettivi, che sono alla base dei fenomeni vulcanici e dei movimenti delle placche tettoniche, e quindi dei terremoti.

Dopo un'altra zona di transizione di circa 250 km troviamo la Crosta, relativamente molto sottile: circa 10 km quella oceanica e da 30 a 70 km quella continentale.

Le indagini sull'interno della Terra

I geologi hanno a disposizione due metodi di indagine: quello geofisico e quello geochimico.

Il primo si fonda sullo studio delle onde sismiche; dalla loro velocità di propagazione si possono avere informazioni sulla fase della materia terrestre (liquido o solido: per esempio in un liquido le perturbazioni trasversali non si trasmettono) e sulla sua densità.

I metodi geofisici non danno però nessuna informazione sulla composizione chimica della Terra.

I metodi geochimici si basano su due tipi di investigazioni: i carotaggi e i modelli geochimici. I carotaggi, per ovvie ragioni, possono dare informazioni solo sulla Crosta: il carotaggio più profondo che si conosce è di 12 km a Kola, in Siberia. Ma ulteriori informazioni possono essere ottenute dalle fessurazioni che sono presenti nel mezzo degli oceani: sono fessurazioni della Crosta dalle quali affiora il Mantello.

Inoltre le rocce portate in superficie dalle eruzioni vulcaniche, anche se possono subire delle modifiche durante il loro percorso fino alla superficie, possono fornire un ulteriore contributo informativo.

I modelli geochimici, invece, si basano sull'ipotesi che tutto il sistema solare debba avere una composizione simile. Vengono quindi studiate le meteoriti e il Sole per ottenere deduzioni sulla composizione della materia terrestre, ragionando per analogia.

Queste investigazioni hanno contribuito allo sviluppo di un modello della Terra, il *Bulk Silicate Earth* (BSE), che attualmente è il riferimento principale

per i geologi. Questo modello è, se così si può dire, un ibrido, in quanto da una parte si sviluppa attraverso una ricostruzione dell'evoluzione del Mantello primordiale, e dall'altra tiene conto delle misure fatte con i metodi geochimici sulla situazione attuale del nostro pianeta.

Il ruolo dei decadimenti radioattivi

L'esistenza di decadimenti radioattivi nella Crosta terrestre è stata messa in evidenza dai carotaggi eseguiti dai geologi. Si tratta di decadimenti radioattivi provenienti dai nuclidi instabili delle famiglie del ^{238}U (Uranio) e ^{232}Th (Torio), nonché del nuclide instabile ^{40}K (Potassio). I decadimenti della famiglia del ^{238}U sono esoenergetici con un'emissione globale di 51,7 MeV, mentre quelli della famiglia del ^{232}Th , ne forniscono 42,8 MeV. Il ^{40}K , essendo un singolo decadimento, produce solo 1,32 MeV di energia.¹

Tutta questa energia si trasforma alla fine in calore.

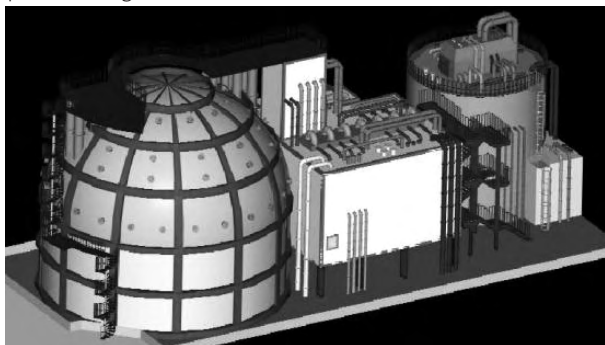
L'ipotesi logica è che questi decadimenti radioattivi siano presenti anche nel Mantello, le cui dimensioni sono enormemente superiori a quelle della Crosta: quindi anche se in esso la quantità di materiale radioattivo fosse inferiore a quello della Crosta, la sua incidenza totale sarebbe estremamente superiore. Viceversa, per ragioni di affinità chimica nei confronti della lega di Fe-Ni, si pensa che il Core non contenga materiale radioattivo.

Il modello BSE, che come abbiamo detto, si rifà in parte alla composizione delle meteoriti, prevede che circa 19 TW del calore terrestre siano dovuti ai decadimenti radioattivi. Altri modelli prevedono che l'origine di tutta l'energia calorifica della Terra (31 o 44 TW) sia radiogenetica.

Non devono stupire queste grandi incertezze dei modelli geologici; i mezzi di indagine a disposizione dei geologi sono, per questo scopo, molto limitati. Se ci rifacciamo a quanto affermato all'inizio di questo articolo riguardo alla stima del calore terrestre totale, possiamo osservare che anche in questo caso l'intervallo di possibilità è molto esteso: da 31 a 44 TW. La ragione di questa incertezza è dovuta ai diversi metodi usati nelle valutazioni. La prima stima (31 TW) è ottenuta estrapolando il gradiente di temperatura all'interno della Crosta terrestre, misurato attraverso i carotaggi. Il secondo numero viene ottenuto da osservazioni fatte nelle fessurazioni oceaniche, ove affiora il Mantello: la temperatura in questo caso diminuisce andando dal centro di queste fessurazioni verso i limiti laterali costituiti dalla Crosta. In aggiunta va considerato anche il raffreddamento dovuto all'acqua oceanica. Infine esiste anche un modello (georeattore), considerato un po' esotico, che ipotizza

¹ (MeV significa Megaelettron-Volt, cioè 10^6 eV. L'elettronVolt, eV, è un'unità di misura molto usata nella Fisica delle Particelle. È l'energia che un elettrone acquista fra due punti, la cui differenza di potenziale è 1 Volt. $1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19}$ Joule).

Schema degli impianti di Borexino nel Laboratorio sotterraneo del Gran Sasso. A destra il Counting Test Facility. A sinistra il rivelatore (il primo a sinistra) con gli impianti di radio-purificazione



l'esistenza di grandi quantità di uranio presenti intorno al Core. Potrebbe esistere, in questo caso, un enorme reattore che funziona all'interno del nostro pianeta, producendo quindi l'energia termica.

Il neutrino

I decadimenti beta delle famiglie naturali radioattive emettono, oltre all'elettrone, anche un antineutrino, cioè l'antiparticella del neutrino.

Il neutrino, e la sua antiparticella, fanno parte della famiglia dei leptoni, una delle due famiglie nelle quali sono raggruppati i costituenti elementari della materia, le cosiddette Particelle Elementari.

Rispetto agli altri leptoni, fra i quali va annoverato l'elettrone, il neutrino ha carica elettrica zero e ha una massa piccolissima. Esso inoltre ha una probabilità bassissima di interagire con i componenti della materia che attraversa.

Un neutrino, per esempio, potrebbe anche attraversare tutto l'Universo senza mai interagire. Mentre un fotone prodotto all'interno del Sole impiega circa diecimila anni a fuoriuscire dalla stella, il neutrino esce imperturbato in pochi minuti. Quindi, date queste proprietà, anche l'attraversamento della Terra non ne modifica le caratteristiche. Questa peculiarità del neutrino fa di esso una formidabile sonda, capace di trasportare informazioni da siti non altrimenti raggiungibili.

D'altro canto questa bassissima probabilità di interagire rende molto difficile studiare sperimentalmente il neutrino, perché sono rare le volte che esso crea un urto all'interno del rivelatore e quindi i segnali relativi vengono completamente mascherati dal cosiddetto «fondo». Si indicano con il

Particolare dell'interno del *Counting Test Facility*, prototipo di *Borexino*, per la misura di bassissimi livelli di Radioattività



nome di fondo le interazioni di particelle che nulla hanno a che fare con quanto si vuol misurare: in questo caso gli urti fra i neutrini e i costituenti elettricamente carichi della materia rivelante. I segnali, dovuti al fondo, possono simulare le interazioni prodotte dai neutrini, e comunque con il loro numero esorbitante rendono impossibile il loro riconoscimento. Tali interazioni hanno soprattutto due origini: i raggi cosmici e la radioattività naturale. I primi, che ci piovono

sulla testa in grande quantità, vengono combattuti andando sotto terra. I Laboratori sotterranei del Gran Sasso, i più grandi del mondo per questo tipo di Fisica, hanno una copertura di circa 1800 metri di roccia, che riescono ad assorbire tutte le particelle e le radiazioni che arrivano dal cosmo, eccetto i neutrini appunto, mentre riducono di sette ordini di grandezza il flusso di un altro leptone, il cosiddetto «muone».

Il secondo nemico è rappresentato dalla radioattività naturale presente in tutti i materiali, solidi, liquidi e gassosi, e nell'ambiente (per esempio la roccia della montagna).

Ai Laboratori del Gran Sasso è stato costruito un esperimento, chiamato *Borexino*, il quale è capace di rivelare neutrini anche di bassissima energia, come quelli provenienti dal Sole, e quelli emessi nei decadimenti radioattivi che avvengono all'inter-



Al lavoro durante l'installazione di *Borexino*

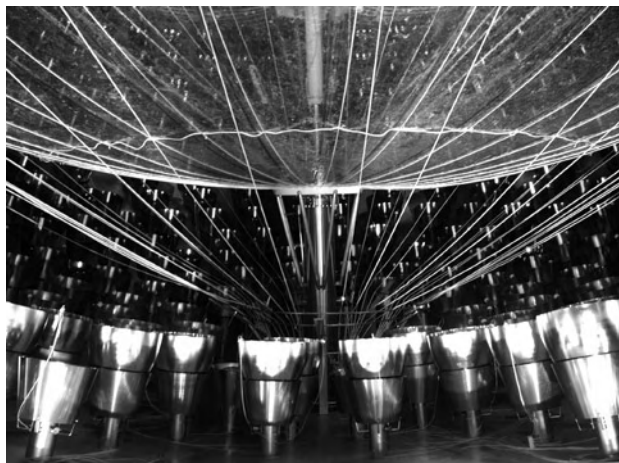
no della Terra. Sei anni di ricerca hanno permesso di sviluppare metodi di purificazione a livelli mai finora ottenuti. L'elemento rivelante di *Borexino*, 300 tonnellate di idrocarburo aromatico con aggiunta una piccola percentuale di un altro prodotto, che produce fotoni di luce quando una particella carica si muove all'interno di esso (scintillatore), è stato radiopurificato al livello di un nucleo di impurità radioattiva su 10^{17} nuclei di scintillatore (cioè cento milioni di miliardi).

Questa caratteristica, che fa di *Borexino* un esperimento unico al mondo, unitamente al grande volume del rivelatore (300 metri cubi di scintillatore, 3400 metri cubi di materiali altamente purificati, che funzionano da schermo per le radiazioni esterne: ambiente, roccia, eccetera) ha permesso di studiare non solo i neutrini emessi dal Sole, ma anche quelli provenienti dall'interno della Terra. Mentre lo studio dei neutrini emessi dal Sole fornisce informazioni sulle reazioni nucleari che avvengono al suo interno, la rivelazione degli antineutrini provenienti dalla Terra ci informa su cosa avviene all'interno del nostro pianeta.

Nonostante il rivelatore *Borexino* sia costituito da una grande massa, il numero di interazioni che si riescono a misurare è sempre molto modesto. Nel caso dei neutrini solari (ne arrivano sulla Terra circa 60 miliardi per cm^2 e per secondo) si osservano una cinquantina di segnali al giorno; nel caso degli antineutrini terrestri, circa un segnale ogni cinquanta giorni.

La misura dei geoneutrini

Borexino è riuscito a ottenere evidenze dell'emissione di antineutrini dall'interno della Terra (geoneutrini); la probabilità di tale evidenza è del 99,997%. Oltre alla sua estrema radio purezza, *Borexino* ha goduto di un altro vantaggio: il basso flusso di antineutrini provenienti da reattori nucleari che raggiungono il sito del Gran Sasso. Infatti gli antineutrini dai reattori disturbano la rivelazione dei geoneutrini, avendo caratteristiche molto simili ad essi.



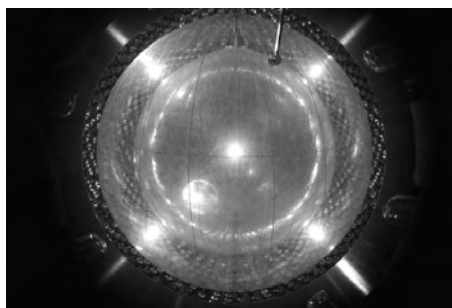
La parte bassa della sfera con i fotomoltiplicatori e le stringhe che misurano lo stress del vessel

Borexino pronto per iniziare la presa dati: visione del vessel di nylon riempito di scintillatore, all'interno della sfera che sostiene i fotomoltiplicatori

Le misure del flusso di geoneutrini eseguite a oggi da *Borexino* non permettono ancora di discriminare fra i vari modelli geologici, a causa della bassa statistica raccolta finora e del conseguente consistente errore statistico. Tuttavia c'è già un'indicazione che favorisce l'ipotesi di un contributo radiogenico del 100% all'energia calorifica terrestre. Saranno necessari altri due anni di raccolta dati per riuscire a definire con precisione tale risultato.

I risultati ottenuti finora sono tuttavia già sufficienti per escludere l'ipotesi del georeattore.

L'evidenza sperimentale ottenuta da *Borexino* apre una nuova era nello studio delle proprietà del pianeta sul quale viviamo. In particolare va notato che



la conoscenza della distribuzione dell'energia termica nel Mantello può dare informazioni sui movimenti conduttivi all'interno di esso. Per ottenere tali informazioni sarebbe necessario fare misure simili a quelle di *Borexino* in vari punti della Terra. Vi sono già in programma tre esperimenti (dei quali però solo uno approvato), uno in Canada, un altro alle Hawaii e un terzo in Finlandia, che potrebbero dare una buona misura dei geoneutrini in quelle posizioni, per non parlare di un esperimento giapponese, *Kamland*, che ha già ottenuto un'indicazione in proposito.

Come di consueto il cammino della Scienza è lento, soprattutto in questo tipo di Fisica che necessita di grandi apparati e le cui difficoltà sono quindi, non solo scientifiche e tecniche, ma anche logistiche, finanziarie e gestionali.

