

SULLA POSSIBILITA' DI REAZIONI A CATENA NELLA CROSTA TERRESTRE (*)

C. FESTA - F. IPPOLITO

1. — La scoperta della fissione dell'uranio e delle reazioni a catena (1) indusse alcuni geologi ad attribuire, sia pure in maniera dubitativa, a questi processi l'origine di fenomeni collegati con il problema del bilancio termico-terrestre e cioè la formazione dei graniti (2) e il vulcanismo (3). All'epoca della scoperta della fissione, il fenomeno della interazione dei neutroni con la materia non era completamente conosciuto e d'altra parte mancava qualsiasi informazione relativa ad una eventuale presenza di neutroni nell'interno della Terra. Sicché quantunque uno degli autori (4) avesse spinto abbastanza avanti la trattazione teorica del problema, non si poté giungere ad alcuna conclusione positiva per mancanza di dati sperimentali. Poiché sotto questo aspetto la situazione è oggi completamente differente, vale la pena di riprendere la questione per mostrare come i numerosi dati sperimentali, acquisiti dal 1945 in poi, provano che le reazioni a catena non possono sussistere nella crosta terrestre.

Cominciamo col considerare le condizioni fisiche e chimiche nelle quali si verificano i processi considerati. È ormai comunemente accettato il modello di una terra composta da un certo numero di strati sferici concentrici. Questa struttura concentrica si desume, com'è noto, da vari dati sperimentali riguardanti la densità e la sua variazione con la profondità, la velocità delle onde sismiche, la rigidità ecc. Essi indicano una brusca variazione delle proprietà fisiche del corpo terrestre per determinati valori della profondità. La questione se ad ogni variazione delle proprietà fisiche corrisponda una variazione dello stato di aggregazione o della composizione chimica è ancora in discussione. Resta comunque stabilita la partizione della terra nelle tre parti principali: nucleo, mantello e crosta.

Fino a pochi anni fa si attribuiva senza discussione al nucleo una composizione simile a quella delle meteoriti ferrose. Nel 1941 Kuhn e Rittmann (5) hanno avanzato l'ipotesi che il nucleo non sia costi-

(*) Comunicazione presentata al Convegno dell'Associazione Geofisica Italiana, tenuto a Roma il 28-29 maggio 1954.

tuito da ferro-nichel metallico, ma da materia solare indifferenziata; al di sopra di questa parte centrale vi sarebbe uno strato molto ricco di ferro e di altri elementi pesanti. Secondo questi autori le discontinuità sismiche non sono un indice di variazione della composizione chimica ai livelli corrispondenti bensì di un brusco cambiamento delle proprietà fisiche. Ad una repentina variazione delle proprietà fisiche della materia attribuisce l'origine delle discontinuità anche W. H. Ramsey (⁶), che considera il mantello ed il nucleo come fasi termodinamiche differenti di una identica sostanza. È invece generalmente accettata l'ipotesi secondo la quale « il mantello » si compone di silicati basici accompagnati da una fase metallica, che va decrescendo al diminuire della profondità.

Per l'esame dei fenomeni, di cui vogliamo qui occuparci, dobbiamo peraltro considerare soltanto la crosta terrestre e la zona magmatica ad essa immediatamente sottostante, come quelle che partecipano ai fenomeni geologici di cui abbiamo fatto cenno sopra.

Secondo le più recenti interpretazioni dei dati sismologici (⁷), che in linea di massima coincidono con le deduzioni di carattere geologico e petrografico (⁸) (⁹), la crosta terrestre può considerarsi costituita da tre gusci sovrapposti, dall'alto in basso: Sial I, Sial II, Sima. Il Sial I è il guscio sialico superiore, costituito prevalentemente da rocce di tipo graniti-gneiss con velocità di propagazione delle onde sismiche longitudinali, $V \sim 5,6$ km/sec: questo guscio non è continuo ed ha uno spessore che varia da 40 km ed oltre, nelle zone orogeniche, fino ad annullarsi in talune zone oceaniche (ad esempio: Oceano Pacifico). Il Sial II è un guscio intermedio (ove $V \sim 6,3$ km/sec), di costituzione ancora alquanto controversa: secondo Rittmann (¹⁰) (¹¹) si tratterebbe di materiale originariamente granitico, depauperato dell'eutettico quarzo-feldspato e quindi di tipo dioritico-lamprofirico. Esso ha uno spessore variabile da una ventina di chilometri (zone continentali) a zero (aree di basso cratone). Il Sima è all'incontro un guscio continuo, ove $V \sim 7,9$ km/sec, costituito da magma di tipo basaltico — magma « originario » sec. Rittmann — solidificato. Lo spessore del Sima varierebbe tra i 25 e i 30 km. La crosta terrestre avrebbe, in totale, spessori variabili da una trentina di km di solo Sima (nelle zone oceaniche) ad un massimo di una settantina di km di Sial I, Sial II e Sima (nelle zone continentali di alto cratone) (vedi fig. 1). Immediatamente al disotto della crosta terrestre — e le maggiori profondità esulano, come abbia-

mo accennato, da questa trattazione — vi è il Sima fuso: magma basaltico ricco di gas (7) secondo la maggioranza dei geologi e dei petrografi.

È ancora da tener presente che sul Sial I poggia, in talune aree continentali, un esile spessore di sedimenti più o meno metamorfosati.

Si tratta ora di esaminare se all'interno della crosta come sopra

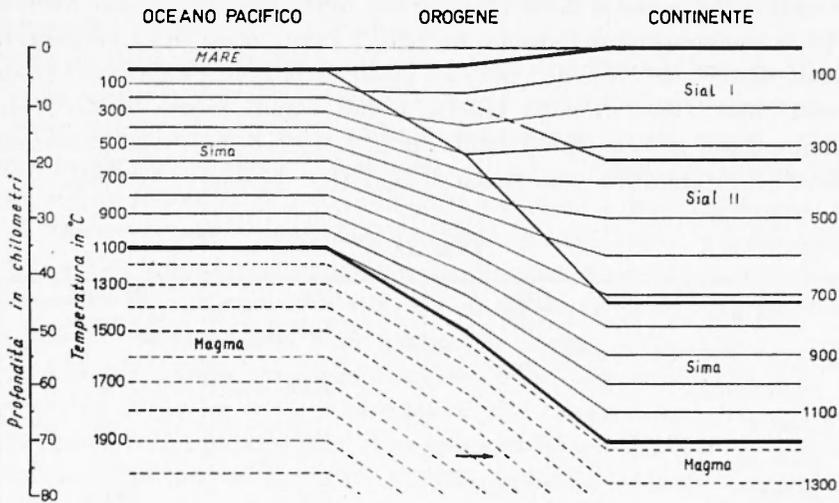


Fig. 1 - Sezione schematica attraverso la crosta terrestre continentale e sotto-oceanica (di tipo Pacifico) con indicazione delle geoisoterme (da Rittmann).

definita: a) sono presenti elementi fissionabili; b) si trovano neutroni in grado di produrre la fissione; c) si verificano le condizioni necessarie per l'innescio di una reazione a catena.

2. — Gli elementi fissionabili naturali sono com'è noto l'uranio e il torio. Seaborg e coll. (12) hanno rivelato la presenza in natura di Pu^{239} , elemento transuranico fissionabile usato nei reattori nucleari: ma le concentrazioni misurate da Seaborg sono talmente basse che questo elemento può essere senz'altro scartato nelle nostre considerazioni. La fissione di elementi di numero atomico inferiore a 90 è stata ottenuta solo da poco mediante neutroni di energia elevatissima (84 MeV) (13). Vedremo in seguito che sulla terra non si hanno a disposizione neutroni con energia tanto elevata.

Perciò nella discussione relativa alla possibilità di reazioni a ca-

(12) Non vi è accordo sostanziale sul chimismo di questo magma, secondo alcuni di tipo *tholeiitico* (ad es. Niggli), secondo altri di tipo *olivinitico* (ad es. Rittmann). Ma ciò non ha importanza ai nostri fini.

tena spontanee conviene concentrare l'attenzione su l'uranio e il torio, quali eventuali combustibili della reazione. È ben noto che il contenuto di uranio e di torio nelle rocce diminuisce con la acidità di queste. Questo fatto prova che gli elementi radioattivi sono prevalentemente concentrati nella crosta. Dalle analisi del contenuto di uranio e torio nelle rocce e dalle abbondanze isotopiche dei singoli nuclidi che li compongono, si possono dedurre i valori medi della concentrazione di U^{238} , U^{235} e Th^{232} nei vari strati della crosta terrestre. Questi valori sono riportati nella tabella I dalla quale risulta evidente la diminuzione nel contenuto totale in U^{238} , U^{235} e Th^{232} nel passaggio dal Sial I (granitico) allo strato di Sial II e da questo al Sima.

TABELLA I

Strato	U^{238} $\times 10^{18}$ g	U^{235} $\times 10^{18}$ g	Th^{232} $\times 10^{18}$ g
Sedimenti	4	0,06	8
Sial I	126	0,9	444
Sial II			
Sima	31	0,2	131

I fenomeni dei quali ci interessiamo hanno sede nella crosta e specie in quelle zone ove sono presenti Sial e Sima. Ora l'uranio e il torio possono considerarsi come elementi « dispersi » nel senso che a questa espressione è stato attribuito da Vernadsky (12) e si comportano, nei processi geochimici, come elementi *litofili*, nel senso di Goldschmidt (13) o anche come *pneumatofili* nel senso di Rittmann (16). Secondo questo ultimo inoltre la povertà in U e Th della zona del Sial II è causata proprio da questo carattere geochimico di tali elementi. Il Sial II, secondo l'interpretazione di vari autori, sarebbe come già accennato, costituito da rocce granitiche depauperate sia dell'eutettico quarzo-feldspato sia di quegli elementi, che, con tale eutettico, tendono a consolidare nelle soluzioni magmatiche residue, tra i quali appunto l'uranio e subordinatamente il torio. Tale depauperamento sarebbe avvenuto specialmente per effetto del « rastrellamento » operato dal passaggio di « fluidi » provenienti dalle profondità suberustali (14).

(*) Sarebbe appunto dovuto a fenomeni di questo tipo il fatto constatato che i graniti geologicamente più recenti, che hanno cioè subito più cicli petrogenetici, arricchendosi sempre più di elementi litofili, sono più ricchi di U e Th di quelli più antichi. Vedi Rittmann (17), tab. a pagg. 248-249.

È inoltre da tenere ben presente che l'uranio non è contenuto nelle rocce ignee di tipo granitico se non in sostituzione isomorfofoga di *Th* o di altri elementi di prossimo raggio ionico (*Ti*, *Zr*, ecc.) in minerali accessori di primissima consolidazione ed è pertanto estremamente « disperso ». Va poi a concentrarsi, per i ben noti processi magmatici, come ossido cristallizzato o non (uraninite e pechblenda) in formazioni pegmatitiche, pneumatolitiche o idrotermali, che non hanno alcuna importanza, a causa delle loro dimensioni geologiche, per i problemi di cui trattiamo, sebbene costituiscano i « giacimenti », cui si approvvigiona l'uomo. E comunque si tratta di formazioni presenti per la loro genesi geologica, nella parte più esterna della litosfera (17).

Queste considerazioni, derivanti dalle caratteristiche geochemiche di *U* e *Th*, inducono pertanto a ritenere come altamente improbabile l'esistenza di concentrazioni rilevanti di questi elementi, che costituiscono il « combustibile » delle reazioni a catena.

Ciò per quanto concerne l'origine delle rocce granitiche. Per i fenomeni *vulcanici* occorre aggiungere alle considerazioni di cui sopra quelle informazioni che ci vengono dalle più recenti ed ampie trattazioni in proposito (18) (8) (9). Il vulcanismo — inteso come manifestazione esterna di processi magmatici — si riconnette ai fenomeni di plutonismo, di cui abbiamo fatto cenno di sopra, ovvero più di frequente trae origine più profonda — ed è questo il *vulcanismo tipico* — cioè dalle zone magmatiche sottocrostaali di tipo simatico. La concentrazione di *U* e *Th* in queste zone della crosta terrestre o della zona magmatica subcrustale, come si vede dalla tabella 1, e come si deduce da tutte le ricerche dirette su vulcaniti intermedie e basiche, è notevolmente più bassa di quella del materiale sialico. Non è quindi il caso di insistere ulteriormente su questo aspetto del problema.

3. — Non possediamo alcun dato sperimentale riguardo alla presenza di neutroni nella parte più interna della crosta terrestre. Essa è stata peraltro provata nelle rocce della superficie terrestre. I neutroni ivi osservati provengono da: 1) la radiazione cosmica; 2) la fissione spontanea del U^{238} ; 3) i processi (α , n) prodotti dalle particelle emesse dagli elementi radioattivi naturali. Seaborg (12) valuta a ca. 30/min il numero dei neutroni generati in 100 g di pechblenda contenenti ca. il 13% di uranio. All'epoca in cui Seaborg ha fatto la sua valutazione, il valore della costante di decadimento per fissione spontanea del U^{238} , e il numero dei neutroni emessi nella fissione spontanea erano conosciuti con qualche incertezza. Facendo uso dei va-

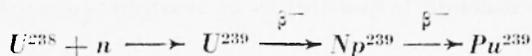
lori ottenuti recentemente con misure più precise (¹⁹) si trova che nel campione esaminato da Seaborg sono presenti 12 neutroni/min.

Vediamo ora se da questi dati relativi ai neutroni presenti sulla superficie terrestre si può dedurre qualche informazione sulla eventuale esistenza di neutroni a grandi profondità. La misura della intensità della radiazione cosmica totale è stata spinta fino a 600 metri ca. di profondità (²⁰). I risultati di queste misure inducono ad escludere la possibilità di una penetrazione delle particelle cosmiche nella parte più interna della crosta terrestre. Le sole sorgenti di neutroni efficienti in quelle zone sono dunque la fissione spontanea del U^{238} e i processi (α, n) . Poiché abbiamo visto che il contenuto di elementi radioattivi diminuisce con la profondità possiamo concludere che il numero di neutroni presenti nella parte interna della crosta terrestre è inferiore al numero di neutroni presenti in superficie. Dunque oltre gli elementi radioattivi, che costituiscono il combustibile della reazione, si riduce con la profondità anche il numero dei neutroni, cioè degli agenti principali della reazione a catena.

Rimane ora da stabilire quale probabilità ha un neutrone, emesso per fissione spontanea del U^{238} oppure in un processo (α, n) di innescare una reazione a catena. Supponiamo che, attraverso uno dei due processi suddetti in una roccia radioattiva venga emesso un certo numero di neutroni. La loro energia media è dell'ordine di 10^6 eV.

La probabilità che un neutrone di questa energia venga catturato da un nucleo di U^{238} dando luogo alla fissione del nucleo stesso è molto piccola. I neutroni continueranno a muoversi entro la roccia subendo una serie di urti contro i nuclei degli altri elementi che accompagnano l'uranio nella roccia medesima. Durante questi urti un certo numero di neutroni verrà assorbito per cattura da parte dei nuclei stessi. In conseguenza degli urti la energia dei neutroni non catturati diminuisce rapidamente. Se essa potesse ridursi fino al valore termico i neutroni comincerebbero a diffondere fino a quando sarebbero assorbiti da un nucleo di U^{235} , perché la probabilità di cattura dei neutroni con energia termica da parte del U^{235} è particolarmente elevata ($\sigma_c = 500$ barns). Questo processo di cattura che dà luogo alla fissione del nucleo del U^{235} costituisce com'è noto il primo stadio della reazione a catena. In realtà i neutroni non raggiungono le energie termiche perché durante il processo di rallentamento e precisamente quando la loro energia si aggira intorno a 7 eV la probabilità di cattura da parte del U^{238} diviene grandissima ($\sigma_c = 1800$ barns). Si tratta

di un processo (n, γ) nel quale viene generato Pu^{239} secondo la reazione:



Questo processo di cattura da parte del U^{238} è in concorrenza con il processo di fissione indotta del U^{235} sul quale si fondano le reazioni a catena, in quanto assorbe i neutroni prima che essi abbiano rag-

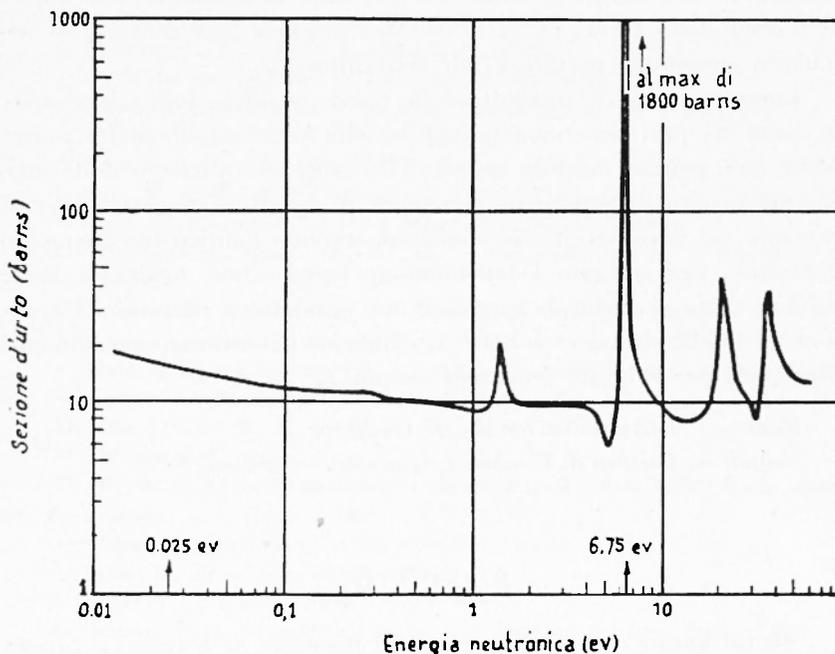


Fig. 2 - Sezione d'urto totale dell'uranio naturale in funzione dell'energia neutronica ⁽²¹⁾.

giunta la energia necessaria per la fissione indotta del U^{235} . Se si tiene conto del fatto che l'abbondanza isotopica del U^{238} è del 99.3% si comprende perché nell'uranio naturale non possono prodursi reazioni a catena, se non ricorrendo a particolari artifici ⁽²¹⁾ che riducono la probabilità di cattura da parte del U^{238} . Da queste considerazioni di carattere nucleare si desume perciò la impossibilità di attuazione di reazioni nucleari nelle rocce terrestri.

Poiché abbiamo visto che per quanto riguarda l'abbondanza dei combustibili nucleari e degli agenti delle reazioni a catena la situa-

zione diviene sempre più sfavorevole alla attuazione delle reazioni medesime, man mano che si procede nell'interno della crosta, possiamo concludere escludendo la possibilità di reazioni a catena nella crosta terrestre.

Esse potrebbero aver luogo solo nel caso che il rapporto isotopico $U^{238}/U^{235} = 139$ fosse notevolmente alterato in conseguenza di un processo di arricchimento di U^{235} . Ma finora variazioni così rilevanti non sono state osservate né nelle rocce né nelle meteoriti, che costituiscono la sola fonte di informazione sulle abbondanze dei nuclei all'interno della terra, né si conoscono processi geochimici che potrebbero comunque portare a tali arricchimenti.

Emerge quindi chiaramente dalle brevi considerazioni sopra espone come sia praticamente impossibile, allo stato attuale delle nostre conoscenze, pensare ad una genesi delle rocce granitiche o della attività magmatica in genere da fenomeni di carattere nucleare. Per il momento ciò deve bastare, se vogliamo, secondo l'antico insegnamento di Hutton, per spiegare i fenomeni geologici « non utilizzare forze che non siano connaturali al globo, non ammettere reazioni ad eccezione di quelle di cui ci è noto il principio, né invocare accadimenti eccezionali per spiegare fenomeni comuni ».

Roma — Istituto Nazionale di Geofisica.

Napoli — Istituto di Geologia Applicata — giugno 1954.

RIASSUNTO

Alcuni autori hanno ricercato nella presenza di reazioni a catena all'interno della crosta terrestre la soluzione di alcuni problemi geologici e geofisici. Nel presente lavoro si discute la possibilità di tali reazioni e dal punto di vista geologico e dal punto di vista nucleare. Come risultato di queste discussioni si è indotti ad escludere la presenza di reazioni a catena nell'interno della crosta terrestre.

SUMMARY

The existence of nuclear chain-reactions inside the Earth's crust has been supposed by some Authors in order to explain some geological and geophysical problems. The possibility of such processes is discussed

from the geological and nuclear point of view. As a result of this discussion the existence of nuclear chain-reactions in the Earth's crust seems to be excluded.

BIBLIOGRAFIA

- (1) TURNER L. A., *Rev. Mod. Phys.*, 12, 150, (1940).
 (2) ANDREATTA C., *Rend. Soc. Min. It.*, 1, 43 (1946).
 (3) NOETZLIN J., *C. R. Ac. Sci.*, 208, 1662, (1939).
 (4) NOETZLIN J., *J. de Phys. et Rad.*, 8, 90 (1940).
 — *Bilans énergetiques en Géophysique*, Hermann, Paris 1948.
 (5) KUHN W. und RITTMANN A., *Geol. Rundschau*, 32, 46, (1942).
 (6) RAMSEY W. H., *M.N.R.A.S.*, 108, 406, (1948).
 (7) GUTENBERG B., *The Internal Constitution of the Earth*, New York (1951).
 (8) DALY R. A., *Igneous Rocks and the Depth of the Earth*, New York (1933).
 (9) NIGGLI P., *Gesteine und Minerallagerstätten*, Basel (1948).
 (10) RITTMANN A., *Rend. Acc. Sci. Fis. e Mat. della Soc. R. di Napoli*; S. 4, vol. 13, (1942-45).
 (11) IPPOLITO F., *Mem. e Note Ist. Geol. Appl. Univ. di Napoli*, 1, 39, (1948).
 (12) LEVINE C. A. and SEABORG G. T., *J. Am. Chem. Soc.*, 73, 3278, (1951).
 (13) POLLARD E. and DAVIDSON W. L., *Applied Nuclear Physics*, N. York (1951).
 (14) VERNADSKY W. J., *La Géochimie*, Paris (1924).
 (15) GOLDSCHMIDT W. M., *J. Chem. Soc.*, 655, (1937).
 (16) RITTMANN A., *Experientia*, 3, 8, (1947).
 (17) RITTMANN A., *Vulcani, attività e genesi*, Napoli (1944). Confr. anche *Archives des Sciences*, 4, 5, Genève, 1951.
 (18) CLOOS H., *Einführung in die Geologie*, Berlin (1936).
 (19) SEGRÈ E., *Phys. Rev.*, 86, 21, (1952).
 (20) JANOSSY L., *Cosmic Rays*, Oxford (1949).
 (21) MURRAY R. L., *Introduction to Nuclear Engineering*, New York (1954).