

La zona di transizione fra mantello e nucleo terrestri è stratificata: sua probabile origine

P. CALOI

Ricevuto il 10 Dicembre 1966

RIASSUNTO. — Si portano nuove testimonianze comprovanti l'esistenza di una zona di transizione (comportantesi come solida) fra quella che era ritenuta la base del mantello, a 2900 km di profondità (superficie di Wiechert-Gutenberg), e il nucleo terrestre. Nel 1964 l'autore provò che tale zona ha lo spessore approssimativo di 160 km, e che in essa la velocità di propagazione delle onde longitudinali decresce gradualmente. In ulteriori determinazioni, che vengono qui presentate, si valuta che, a contatto con il nucleo la velocità delle onde *P* sia dell'ordine di 10 km/sec. Analoga flessione consegue per le onde trasversali.

Appare chiara la stratificazione della zona di transizione, come lo dimostra la registrazione di impulsi successivi, nettamente intervallati, provenienti da discontinuità comprese fra la base del mantello (superficie « *c* ») e l'inizio del nucleo (superficie « *N* »).

Per la giustificazione di tale zona, si ritiene idonea la teoria di Ramsey. Se il mantello inferiore — conformemente alle conclusioni dei geochimici — consiste di un sistema a più componenti (p. es. ossidi compatti di magnesio, silicio e ferro, come propone Birch), la zona, nel suo complesso, corrisponderebbe alla transizione del mezzo, per pressione, dalla fase molecolare alla fase metallica, le discontinuità corrispondendo al completo transito di fase dei diversi componenti. Alla transizione totale dell'ultimo componente, conseguirebbe la formazione del gas degenere di Fermi. Per questa via verrebbe spiegata la caduta di velocità delle onde elastiche, legata al forte aumento della densità e alla progressiva diminuzione della rigidità.

Come l'autore ha già provato nel 1964, l'esistenza della zona di transizione risolve — fra l'altro — le difficoltà inerenti alla propagazione delle onde longitudinali nella zona d'ombra.

Naturalmente, il chiarimento della costituzione del mantello inferiore, porta con se ovvie revisioni anche per la parte più interna della Terra, comprendente il nucleo esterno e il nucleo interno.

SUMMARY. — New evidences about the existence of a transition zone between the lower mantle and the core are carried.

In 1964, the author proved this zone is about 160 kms thick and velocity of elastic waves decrease in it gradually. Now he judges the velocity of P wave, at the bottom of the transition zone, of 10 km/sec order.

The zone results layered, how the record of intervalled, successive pulses proves.

For the giustification of this zone the Ramsey's theory is thought fit

1. — In una Nota presentata fra gli Atti dell'Accademia dei Lincei nel Giugno del 1964 (1) avevo provato che le anomalie di propagazione delle onde longitudinali, legate alla così detta zona d'ombra, possono ottenere chiara spiegazione se si ammette che il mantello terrestre non confina bruscamente con il nucleo esterno, bensì ne è separato da una zona di transizione, caratterizzata da velocità decrescenti delle onde longitudinali (e trasversali). Sulla base dello studio delle onde PcP , ScP , PcS , ScS , registrate da strumenti a breve periodo, concludevo che la zona di transizione su detta doveva presentare uno spessore di 160 km. ca. Le onde riflesse dalla base della zona stessa, indicavo con il simbolo intermedio " N " ($P_NP \dots S_NS$) a significare che essa costituiva l'effettivo inizio del « Nucleo ».

La validità di quelle conclusioni è dimostrata dalle nuove testimonianze che qui presento (vedi Figg. 1, 2, 3, 4).

Oltre a confermare quanto è stato sopra riassunto, dal loro esame possono essere tratte ulteriori precisazioni.

1) Non solo esiste la zona di transizione tra mantello inferiore e nucleo, ma essa è quasi certamente stratificata. Gli impulsi che seguono le ScS , p. es., ($S_{N1}S$, ... S_NS) possono spiegarsi solo come echi su superficie riflettenti, poste a quote diverse fra la superficie di Wiechert (« c ») e il nucleo (« N »).

2) Raramente gli apparecchi, di periodo proprio superiore ad 8-10 sec, registrano onde di tipo S_NS . Esse, assieme alle ScS , ... appaiono chiaramente solo sulle registrazioni di sismografi a breve periodo.

Gli apparecchi a lungo periodo registrano onde ScS con periodi di 10-15 sec; e in esse si esaurisce il fenomeno della riflessione, quasi che il loro periodo fosse imposto dall'intera zona di transizione, che risponde

all'onda incidente come la crosta terrestre risponde all'energia incidente per la formazione delle onde che io chiamo di Somigliana ($C_{i,j}$, per es.) (2).

Soltanto l'energia associata ai brevi periodi, dopo parziale riflessione alla base del mantello (discontinuità di Wiechert), riesce a penetrare nella zona di transizione e a subire successive riflessioni nelle stratificazioni interne, l'ultima delle quali sarà in corrispondenza della superficie « N ».

3) Le ScS presentano trascurabile componente verticale (Figg. 1, 3), mentre tale componente si fa sensibile per onde riflesse nell'interno e alla base della zona di transizione. Sembra quasi che le onde ScS siano di tipo SH , mentre penetrano e vengono riflesse nella zona di transizione onde di tipo SV .

Questo fatto spiega perchè le onde ScP siano di piccolissima ampiezza (solo la componente SV può trasformarsi infatti in onde P), mentre l'ampiezza della PcS è sempre più marcata perchè le P , cambiando carattere nella riflessione, possono mutarsi soltanto in SV (Figg. 1, 3).

Dalla differenza $ScP-PcS$ è possibile trarre il valore approssimativo della profondità ipocentrale.

Si potrà osservare che la differenza $S_N S-ScS$, pur diminuendo con la distanza epicentrale, presenta una diminuzione piuttosto lenta (si confrontino le registrazioni ottenute a Tolmezzo per distanze epicentrali dell'ordine di 1500 km con quelle ottenute, p. es., a Quetta per distanze epicentrali dell'ordine di 5700 km).

La spiegazione è la seguente. In un mezzo stratificato, caratterizzato da velocità delle onde elastiche via via decrescenti, il tragitto di onde in esso rifratte sotto angoli d'incidenza via via crescenti, non differisce di molto da quello di onde incidenti pressochè normalmente, in quanto si verifica, nella propagazione verso il basso, un progressivo avvicinamento alla normale nel punto d'incidenza. A questo riguardo, dev'essere sensibilissima la diminuzione della velocità delle onde trasversali verso la base della zona di transizione, come è provato dal lungo persistere di onde di tipo $S_N S$, dopo la registrazione dell'ultimo impulso (vedi Fig. 1 *g*, Tolmezzo).

Che la velocità delle onde longitudinali (e trasversali) diminuisca sensibilmente nella zona di transito, ho già provato in un precedente lavoro (3).

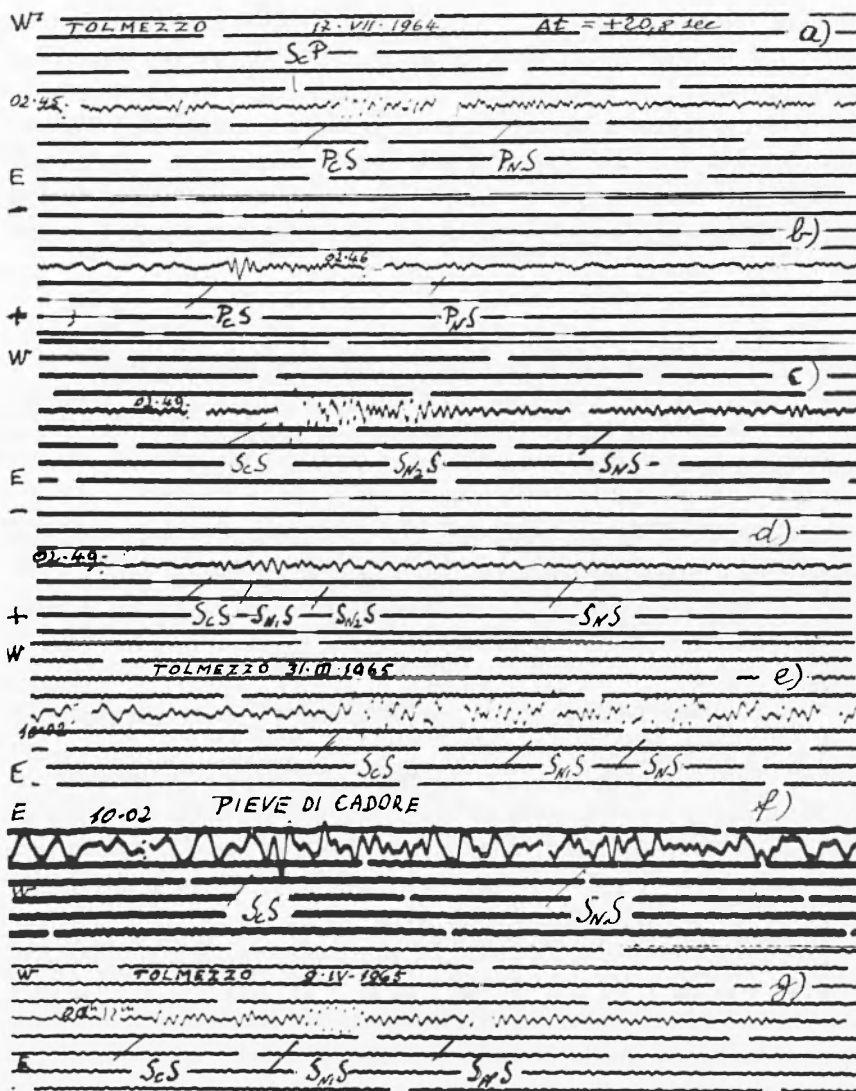


Fig. 1 - 17.VII.1964 (Grecia \div $38^{\circ},2$ N; $23^{\circ},7$ E; $H = 02.34.26,9$; $h = 150$ km. a) b) c) d) registrazioni di Tolmezzo ($\Delta = 1300$ km); per le onde miste, sulla comp. vert. appare netta la sola P_{cs} (vedi b). La ScS , molto ampia sulla comp. orizz., sembra avere predominanti i caratteri di SH : manca infatti il suo inizio sulla comp. vert.: negli impulsi successivi (S_{N1}, S_{N2}, \dots), appaiono chiari invece i caratteri della SV (vedi d).

31.III.1965 (Grecia: $38^{\circ},4$ N; $22^{\circ},2$ E; $M = 6 \frac{3}{4}$ Pas.; $H = 09.47.29$; $h = 100$ km ca): e) registrazione di Tolmezzo, $\Delta = 1165$ km; f) registrazione di Pieve di Cadore, $\Delta = 1.200$ km.

9.IV.1965 (Grecia: $35^{\circ},1$ N; $24^{\circ},3$ E; $M = 5$; $H = 23.57.03,2$; $h = 51$ km): g) registrazione di Tolmezzo, $\Delta = 1570$ km.

Si è visto che, il valore reale della velocità v_c alla base del mantello può ottenersi dalla formula:

$$v_c = \frac{r_c}{r_0} V, \quad [1]$$

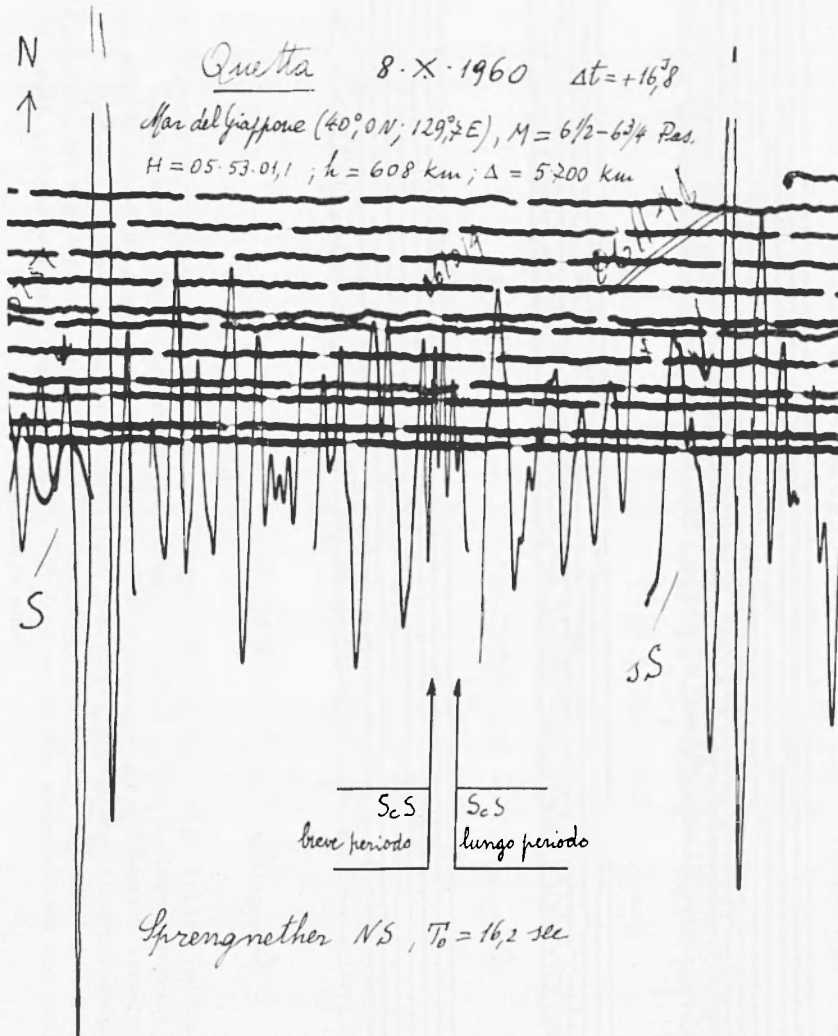


Fig. 2 - Terremoto Mar del Giappone ($40.00^{\circ} N$; $129.07^{\circ} E$). Registrazione di Quetta (NS Sprengether lungo periodo). Le S, sS a lungo periodo appaiono molto sviluppate, nei confronti delle ScS a lungo periodo, sulla comp. NS con periodo proprio di 16.2 . Le componenti Sprengether a breve periodo ($T_0 = 1.8$) della stessa stazione, registrano invece, in maniera predominante, soprattutto le ScS, sNS con periodo di 3° ca (vedi Fig. 3).

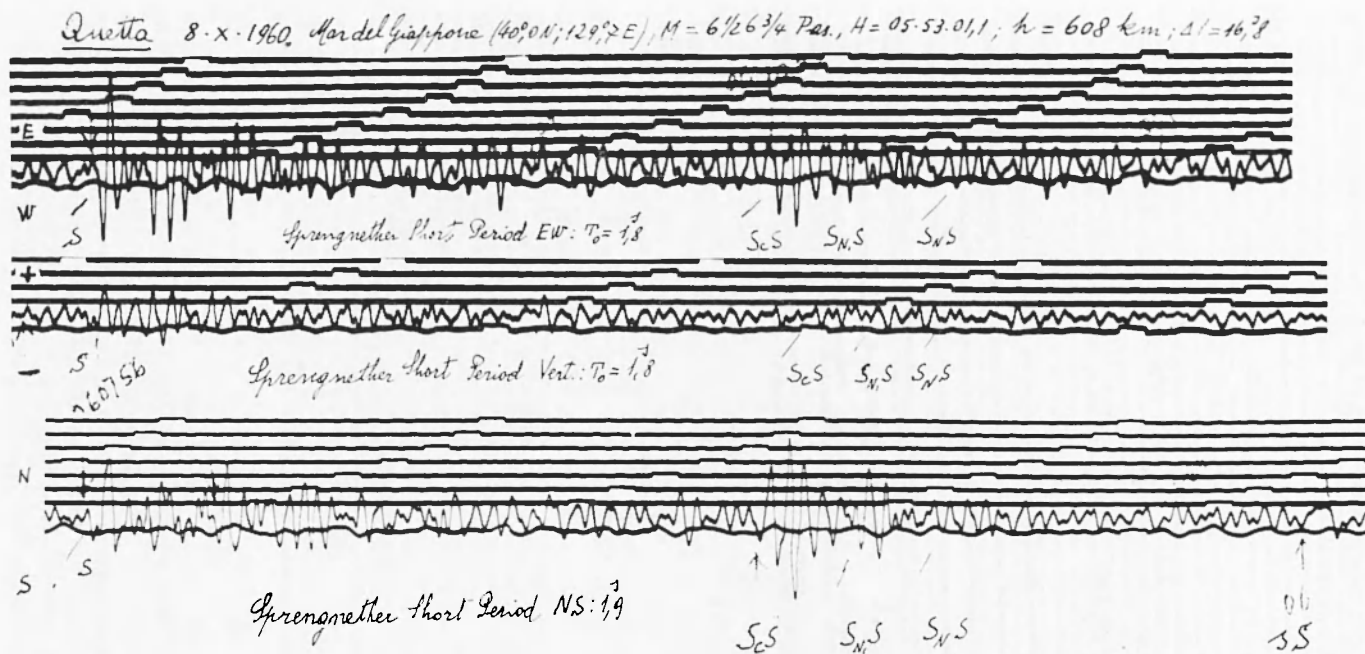


Fig. 3 -- Terremoto del Mar del Giappone (8. X. 1960), registrazioni di Quetta, su componenti Sprengnether a breve periodo. Sugli apparecchi a breve periodo le ScS , ... $S_N S$ — con periodi dell'ordine di 3° — predominano sulle S (vedi NS). Gli impulsi, di ampiezza decrescente, si susseguono a brevi intervalli, a riprova della stratificazione della zona di transizione. La comp. verticale è di piccola ampiezza e, comunque, associata alle $S_N S$. Le S e le sS , amplissime sulla NS — $16^{\circ},2$ (v. Fig. 2), con periodo di 12° ca, mancano, con tale periodo, sulla $NS-1^{\circ},8$. Solo la S vi figura con periodo molto più breve. Le ScS , ... $S_N S$ sembrano quindi la risposta libera degli strati della zona di transizione.

dove r_c è il raggio medio dello strato-base del mantello, r_o il raggio terrestre e V la velocità apparente, tratta dalla traiettoria media dei tempi di tragitto delle onde P nella zona d'ombra.

Nel lavoro citato (*), il valore di V , conseguente all'applicazione del metodo dei minimi quadrati ai 99 tempi di tragitto di onde P registrate nella zona d'ombra, relativi a 27 terremoti a profondità normale, tratti dall'«International Seismological Summary» (24 del 1951 e 3 del 1952), era risultato:

$$V = 25 \text{ km/sec ca.}$$

Fatto $r_c = 3300 \text{ km}$, $r_o = 6370 \text{ km}$, la [1] dà:

$$v_c = 12,95 \text{ km/sec ca.}$$

Un'ulteriore applicazione a 113 valori per le P , registrate nella zona d'ombra, tratti dall'I.S.S., e relativi a terremoti a profondità normale, 5 del 1955 e 8 del 1956, ha condotto ai seguenti valori, per V e v_c :

$$V = 24,7 \text{ km/sec}, \quad v_c = 12,85 \text{ km/sec}.$$

Ho effettuato nuove analoghe determinazioni di V e v_c , per le P relative alla zona d'ombra di sei terremoti singoli.

In queste determinazioni però mi sono limitato alle registrazioni delle onde P ottenute nella prima parte della zona d'ombra, allo scopo di usufruire di dati d'osservazione più attendibili.

La media dei sei risultati, separatamente ottenuti, fatto $r_c = 3300 \text{ km}$, è stata la seguente:

$$V = 21,73 \text{ km/sec}, \quad v_c = 11,49 \text{ km/sec} \pm 0,49$$

mentre l'elaborazione complessiva delle cennate P , relative agli stessi terremoti (Fig. 5), ha condotto a:

$$V = 21,43 \text{ km/sec}, \quad v_c = 11,34 \text{ km/sec} \pm 0,29.$$

Terremoto di Formosa del 12-III-1966.
($24^{\circ},1$ N — 122° , E; $H = 16$ 31 21.8; $h = 63$ km; $M = 7\frac{1}{2} - 7\frac{3}{4}$).

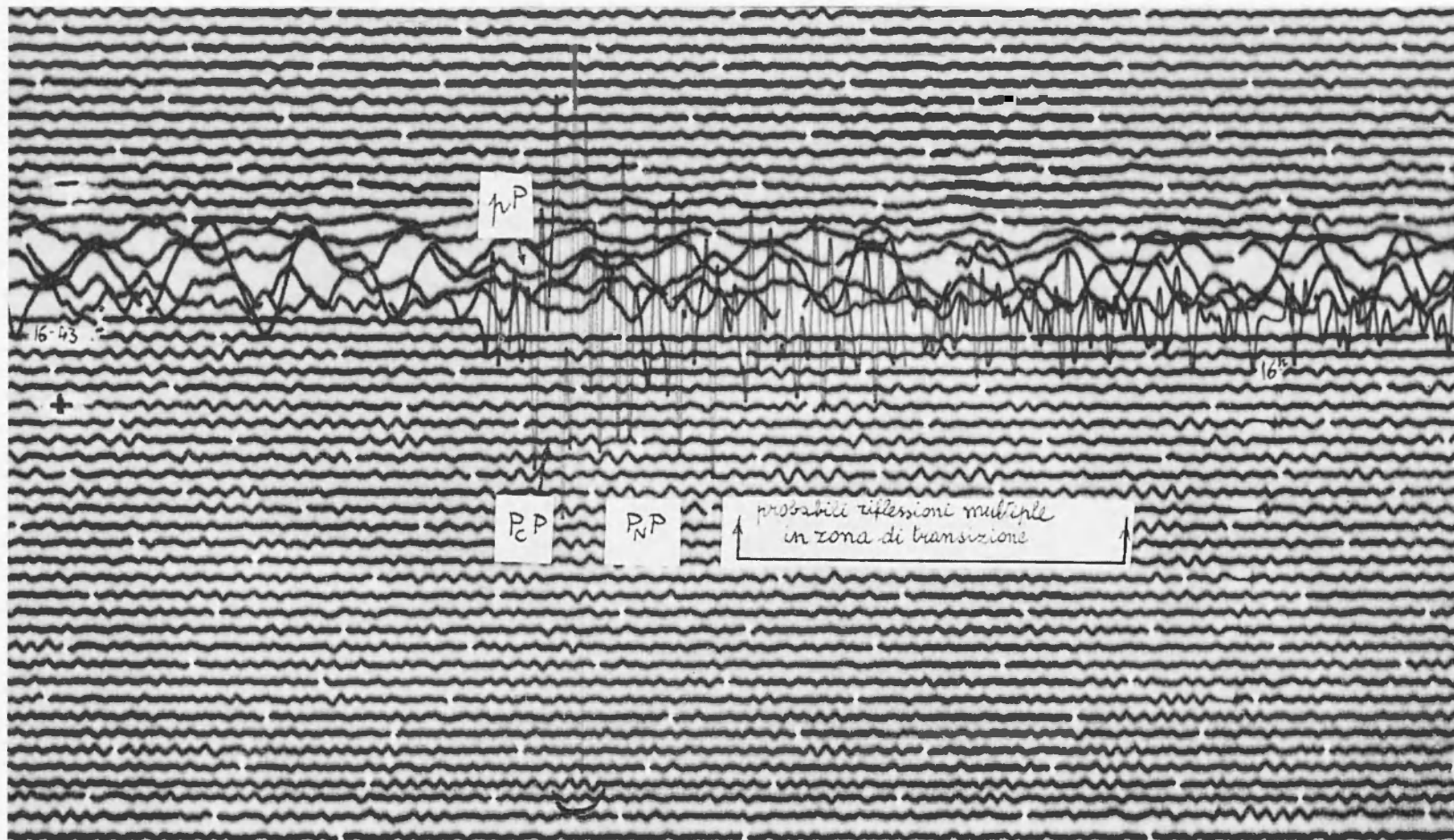


Fig. 4 - Vert. Vajont 12-III-1966 ($\Delta t = +5^s,1$; $\Delta = 9600$ km).

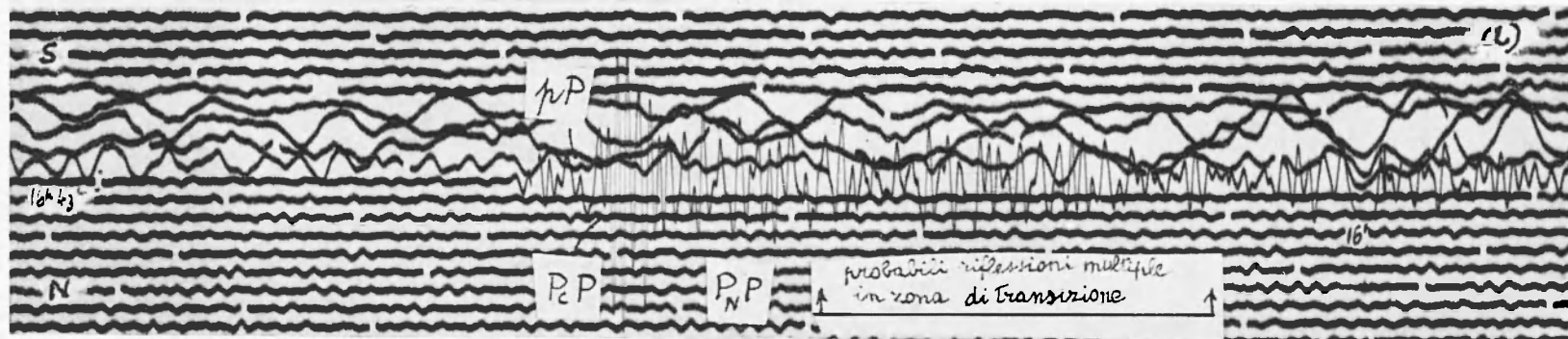


Fig. 4a - Vajont comp. NS.

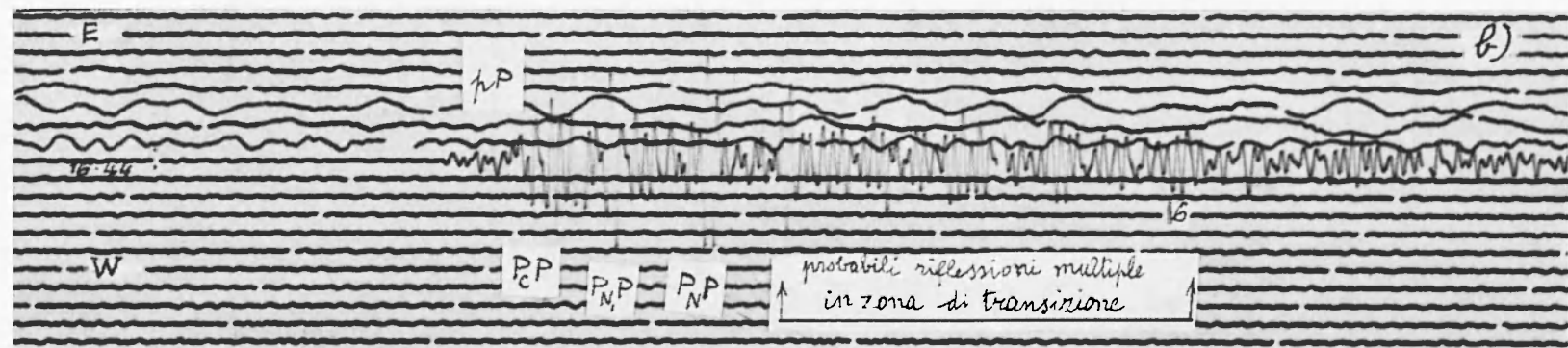


Fig. 4b - Pieve di Cadore; comp. EW ($\Delta t = -46^{\circ},4$; $\Delta = 9600$ km).

Gli impulsi seguenti le P_{NP} per la durata di circa un minuto — rimasti finora senza plausibile interpretazione, specie per le distanze fra 9000 e 10000 km — possono essere spiegati come ritorni in superficie di onde longitudinali che, dopo incidenza contro la superficie di Wiechert, sotto angoli prossimi a 90° , vengono catturati dalla zona di transizione e costretti a propagarsi nelle sue stratificazioni, sotto forma di riflessioni multiple.

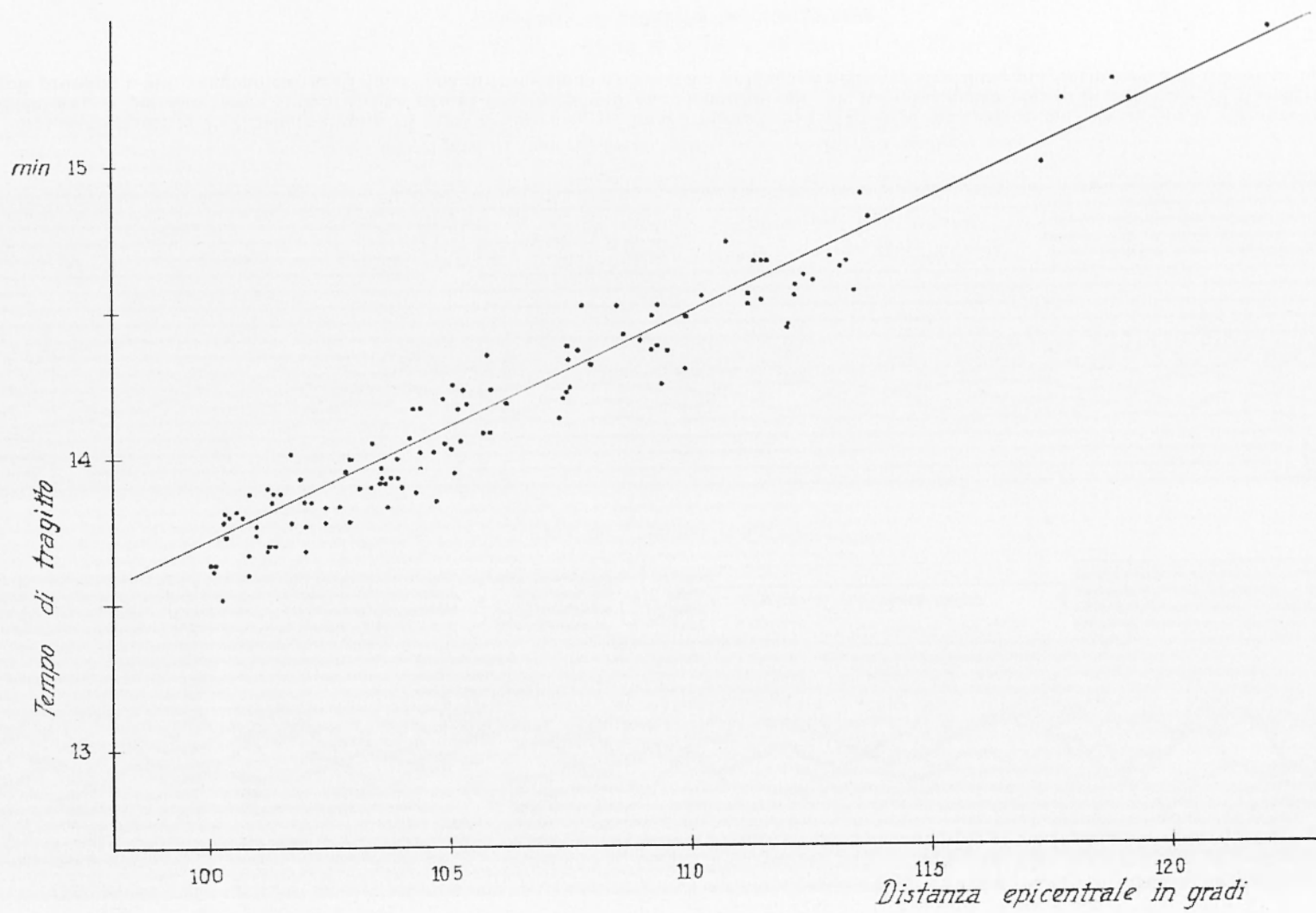


Fig. 5

Il valore così ottenuto per la v_c è quindi alquanto inferiore al valore di 13,75 km/sec, velocità che raggiunge alla base del mantello, in corrispondenza della discontinuità « c ». Se poi si considera che la v_c così ottenuta rappresenta forzatamente il valore medio-massimo della velocità delle onde longitudinali in quella parte della zona di transizione immediatamente al di sotto della discontinuità di Wiechert « c », si può ritenere che tale velocità presenti valori ancora minori, e tenda a decrescere gradualmente verso la superficie « N » (in prossimità della quale la velocità delle onde longitudinali è probabilmente dell'ordine di 10 km/sec).

2. - Prima di passare al problema concernente la formazione della zona di transito fra mantello e nucleo, è bene esaminare, alla luce delle nuove acquisizioni, i risultati di precedenti ricerche sulla natura del nucleo esterno, nell'ipotesi di una separazione brusca della base del mantello dal nucleo.

Particolarmente notevoli, a questo riguardo, i lavori di H. Honda e collaboratori.

a) Nel 1934, H. Honda (¹) aveva esposto una sua teoria sulla rigidità del nucleo, dedotta dall'esame delle *ScS*. Nel 1940, in collaborazione con Y. Hasaya (²), egli applica la teoria esposta allo studio delle *ScS*, associate al terremoto profondo del Mar del Giappone del 13 Novembre 1932 ($\varphi = 43^{\circ}57' N$; $\lambda = 137^{\circ}25' E$, $h = 320$ km).

I calcoli sono stati condotti sulle osservazioni ottenute in 12 stazioni sismiche giapponesi, con distanze epicentrali variabili fra 336 e 1380 km. Il rapporto fra le *ScS* osservate e le *ScS* calcolate (*ScS* oss./*ScS* cal) ha portato alla conclusione che il valore delle *ScS* osservate, è, in media, la metà di quello delle *ScS* calcolate, quando il nucleo viene considerato liquido, mentre, nel caso di un nucleo solido, la *ScS* osservata risulta, in media, 9 volte maggiore della *ScS* calcolata.

I risultati dell'osservazione si approssimano quindi a quelli calcolati molto di più quando il nucleo è supposto liquido, che non quando è considerato solido. Inoltre, mentre riesce difficile spiegare come l'ampiezza osservata possa risultare molto maggiore di quella calcolata, al contrario viene spontaneo attribuire la minore ampiezza degli spostamenti osservati, nei confronti di quelli calcolati, all'assorbimento che l'energia delle onde sismiche subisce durante il lungo percorso delle *ScS*.

Gli Autori ne concludono che la rigidità della parte esterna del nucleo è pressoché nulla.

Conclusione logica, naturalmente, data l'enorme differenza che le osservazioni presentano nei confronti dell'ipotesi di un nucleo solido. Però, come vedremo, è esagerato attribuire al percorso nel mantello l'assorbimento di oltre il 50% dell'energia associata alle *ScS*.

b) Successivamente, Honda, con la collaborazione di Ito (⁶), riprese la questione. Essi studiano la natura del nucleo esterno, sulla base delle osservazioni delle ampiezze delle onde *P*, *S*, *pP*, *ScS* di terremoti profondi. Si preoccupano, in questa ricerca, di tener conto altresì del meccanismo del terremoto in esame [21.IV.1939; $H = 04^h.29^m$ ca; $\varphi = 47^{\circ}36' N$, $\lambda = 140^{\circ}12' E$; $h = 530$ km] all'ipocentro, che condiziona la propagazione dell'energia sismica nelle varie direzioni. A noi interessano qui le conclusioni tratte dagli Autori sulla propagazione delle onde *ScS*. Essi trovano che, supponendo il nucleo esterno liquido, i calcoli portano ad un'ampiezza iniziale delle *ScS* pari a circa il 60% di quella delle onde *S*, non di molto superiore ai dati forniti dall'osservazione; mentre nell'ipotesi di un nucleo esterno solido, l'ampiezza delle *ScS* risulterebbe teoricamente soltanto circa il 5% di quella delle onde *S*.

Conclusione ovvia — e naturalmente giusta —: anche per questa via, la natura elastica del nucleo esterno appare quella di un liquido.

Però, anche questa volta, la pur lieve discrepanza con le osservazioni non può essere giustificata con un transito repentino fra mantello e nucleo.

c) Un'ulteriore ricerca fu condotta sotto la direzione di Honda. Le precedenti indagini di Honda e Hasaya, e Honda e Ito sulle onde *ScS* erano state fondate sulle leggi della riflessione dell'onda *S*, supposta armonica piana. Poiché, per terremoti profondi, l'onda *ScS* registrata nelle stazioni vicine all'epicentro apparve ad Honda con gli aspetti di un'onda solitaria, consistente di una singola oscillazione completa, ricerche più recenti di Honda, Sima e Nakamura (⁷) furono rivolte ad ottenere l'espressione del movimento per onda *SV* riflessa alla superficie di separazione fra solido e liquido (o solido e solido), allorché un'onda impulsiva *SV*, emessa da una sorgente all'interno del solido, incide sulla superficie di separazione.

Sia a_s l'ampiezza dell'onda *S*, incidente verticalmente dal mantello sulla superficie del nucleo e a_r l'ampiezza dell'onda riflessa. Riserviamo l'indice 1 al nucleo e l'indice 2 al mantello; se ρ e v_s rappresentano la

densità e la velocità delle onde trasversali rispettivamente, poniamo:

$$\begin{aligned} \rho_1 = 9,7 \text{ gr/cm}^3 & , \quad \left\{ \begin{array}{l} v_{1,s} = 0 \text{ (nucleo liquido)} \\ v_{1,s} = 4,6 \text{ km/sec (nucleo solido)} \end{array} \right. \\ \rho_2 = 6,66 \text{ gr/cm}^3 & , \quad v_{2,s} = 7,25 \text{ km/sec} . \end{aligned}$$

Per un'onda piana S , incidente normalmente sulla superficie limite del nucleo, supposta piana, si ha:

$$\frac{a_r}{a_e} = \frac{\rho_1 \cdot v_{1,s} - \rho_2 \cdot v_{2,s}}{\rho_1 \cdot v_{1,s} + \rho_2 \cdot v_{2,s}}$$

I valori di a_r/a_e sono illustrati nella Fig. 6, calcolata da Honda e collaboratori per ρ_1/ρ_2 compreso fra 1,0 e 2,2 e $v_{1,s}/v_{2,s}$ variabile fra 0 e 1,0.

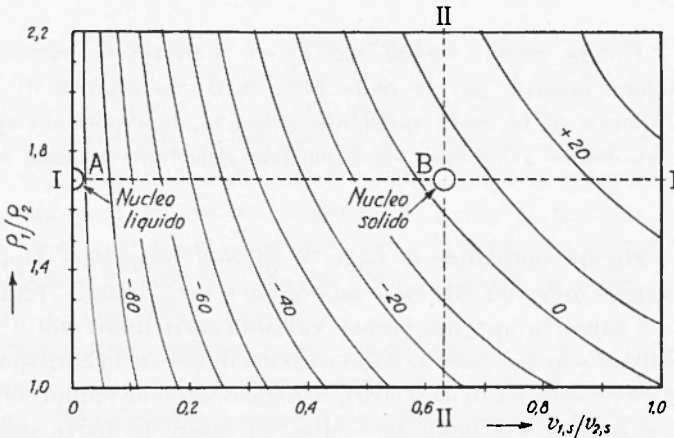


Fig. 6 - Valori di a_r/a_e (%), secondo Honda, Sima e Nakamura.

In Figura 6 la linea I-I rappresenta $\rho_1/\rho_2 = 1,71$, valore corrispondente a quelli generalmente accettati di $\rho_1 = 9,7$ e $\rho_2 = 5,66 \text{ gr/cm}^3$. La linea II-II rappresenta $v_{1,s}/v_{2,s} = 0,63$ valore che — posto uguale a $1/4$ il rapporto di Poisson — corrisponde a $v_{1,s} = 4,6 \text{ km/sec}$ (fatto $v_{1,p} = 8,0 \text{ km/sec}$), nell'ipotesi di un nucleo solido.

Il punto B (intersezione di I-I con II-II) giace nel dominio della figura in cui la fase viene rovesciata e a_r/a_e è molto piccolo (prossimo allo zero). Poiché i risultati delle precedenti indagini sulle onde ScS dei terremoti profondi dimostrano chiaramente che a_r/a_e differisce poco da 1, gli Autori ne concludono che l'ipotesi di un nucleo solido è da escludere.

Il punto *A* corrisponde alle condizioni $\rho_1/\rho_2 = 1,71$, $v_{1,s} = 0$ e $a_r/a_e = 1$, cioè al caso di un nucleo esterno liquido; ed è questo il caso accettato dagli Autori.

Honda e collaboratori considerano un terzo caso; quello in cui $a_r/a_e = -0,6$ oppure $-0,8$ e $\rho_1/\rho_2 = 1,71$. A queste condizioni, la rigidità della parte del nucleo interessata dovrebbe essere 0,06 oppure 0,01 volte quella del solido corrispondente a *B*. Gli Autori, poiché questi valori della rigidità non si possono conciliare con quelli di un qualunque corpo solido normale, negano qualsiasi attendibilità al caso in questione. A mio avviso, tenuto conto della probabile natura della zona di transizione (avente le caratteristiche del gas anomalo di Fermi), è invece questo il caso più interessante esaminato dai tre giapponesi.

A proposito dei risultati delle indagini di Honda e collaboratori, vanno fatte le seguenti precisazioni.

1°. — Honda ritiene l'onda *ScS* essere *solitaria in partenza*. Ora l'osservazione mostra, per le onde *ScS*, tutto un seguito di impulsi che, nell'ipotesi di un'onda incidente solitaria, non possono spiegarsi che con *successive riflessioni* su superficie riflettenti situate a quote inferiori.

2°. — Honda considera le onde *S* ed *ScS* come *fasi coperiodali*. L'osservazione dimostra che ciò è *solo in parte vero*. Risulta, infatti, che mentre le *S* hanno in sostanza periodi variabili entro limiti molto ristretti (come risulta anche per tutte le onde trasversali riflesse in corrispondenza della superficie esterna della Terra), le onde *ScS*—che hanno comunque interessato la base del mantello—oltre ad essere in parte associate a periodi dell'ordine di quelli delle *S* (dalle quali derivano, vedi Fig. 2), mostrano tutta una gamma di periodi con netta prevalenza di quelli brevi, questi ultimi potendo essere rivelati solo da sismografi a breve periodo (vedi Fig. 3). Fra i tanti esempi, basterà citare quello ottenuto a Quetta in occasione della registrazione del terremoto del Mar del Giappone dell'8 Ottobre 1960 (Figg. 2 e 3).

In detta stazione funzionano due componenti *NS* Sprengnether, una a lungo periodo (16,2 sec), l'altra a breve periodo (1,9 sec). Mentre la prima dà amplissime onde *S* (con periodo dell'ordine di 12-14 sec) e onde dello stesso tipo riflesse dalla superficie esterna della Terra (*sS*), con registrazione di *ScS* di relativa piccola ampiezza, la componente a breve periodo registra in modo netto *esclusivamente* le onde *ScS* (con periodi dell'ordine di 2,5-3 sec).

Da ciò conseguono *due conclusioni*:

I. — *Non è consentito un confronto di ampiezze fra le S e ScS, tale confronto risultando forzatamente parziale.*

II. — *Il prevalere di oscillazioni a breve periodo nelle ScS sta a significare che la loro riflessione avviene in un mezzo stratificato in cui la rigidità è fortemente scemata. Il fatto poi che, specie nelle registrazioni a piccola distanza epicentrale, le onde ScS siano seguite da tutta una serie di impulsi a breve periodo sta a provare che il mantello non termina a 2.900 km ca (come generalmente si ritiene), ma che esso è continuato da un mezzo a rigidità ridotta, probabilmente stratificato, di uno spessore complessivo dell'ordine di 160-170 km.*

In complesso, sulla ricerche di Honda e collaboratori, possiamo fare le seguenti osservazioni:

a) Le conclusioni cui giunge Honda, nelle ricerche antiche e recenti, conclusioni che lo conducono a ritenere il nucleo liquido, *non contraddicono all'esistenza di questo strato di transizione.* In effetti, esse sono state tratte nella constatazione dell'esistenza di reazioni paragonabili a quelle di un liquido, il che risulta conforme a quanto è stato detto al punto II. Se, infatti, si invoca la teoria di Ramsey, possiamo ritenere questo strato di transizione come il *graduale passaggio da una fase molecolare ad una fase metallica* per pressione, la quale finisce col confinare con lo strato liquido.

A questo strato può benissimo competere la piccola rigidità trovata da Honda e coll. (v. c) nel caso di $a_r/a_e = -0.6$ (-0.8), e da essi ritenuta non rispondente a nessun solido in condizioni normali. Infatti, nella transizione, per pressione, del basso mantello verso il gas degenerare di Fermi (v. n. 3), la rigidità subisce una progressiva, fortissima diminuzione.

β) Già in precedenza, specialmente dalla Sig.na Lehmann, era stato notato che le onde longitudinali registrate nella zona d'ombra danno tempi di tragitto sensibilmente variabili da luogo a luogo, tanto da indurre la citata Lehmann a ritenere la base del mantello alquanto accidentata.

Ammettendo l'esistenza del mezzo stratificato di transizione tra mantello e nucleo (di cui si è detto al punto II) queste irregolarità trovano piena giustificazione. Esse infatti possono provenire dalla variabilità del tragitto delle onde stesse nelle stratificazioni del mezzo di transizione sopra detto.

Ciò spiega lo sparpagliamento delle onde longitudinali e trasversali alla base del mantello, determinato appunto dalla stratificazione (forse non omogeneamente distribuita) del cuscinetto di transizione. Tale sparpagliamento si riflette naturalmente nei tempi di arrivo delle onde P nella zona d'ombra (dromocrone come medie di tempi sensibilmente diversi), come da Fig. 5.

γ) Honda e Hasaya sostengono che, nel caso più verosimile in cui il nucleo è considerato liquido, l'energia osservata per le onde ScS , corrisponde in media al 50% di quella calcolata (vedi 2 a). Ciò dà una ulteriore conferma dell'esistenza dello strato di transizione tra mantello e nucleo. È da escludere infatti, come si ritiene dai suddetti autori, che il mezzo assorba il 50% dell'energia dell'onda S riflessa dal nucleo, in quanto è risaputo che esso influisce in misura molto minore.

Infatti è stato provato che il coefficiente di attenuazione decresce rapidamente con la profondità (⁸) e che, in ogni caso, l'estinzione ammonta approssimativamente soltanto al 10-15 per cento dei valori che essa assume nella crosta terrestre (⁹).

Del resto, gli stessi autori sono costretti ad ammetterlo nella 3^a delle pubblicazioni citate (vedi 2 c).

È da supporre invece, che l'energia dell'onda S incidente venga restituita per metà sotto forma di ScS (cioè riflessa dalla base del mantello) e per il restante 50% restituita in impulsi successivi sotto forma di $S_N S$, ossia riflessa dalle discontinuità della zona di transizione menzionata, associata a periodi più piccoli.

3. - Quanto è stato trovato da Caloi nel 1964 sulla base dell'osservazione delle onde PcP , ScP , PcS , ed onde associate (nuova notevole documentazione delle quali è stata qui riportata), ha ottenuto recente conferma per altra via (¹⁰).

Nel lavoro citato, avevo ritenuto come più probabile origine dello strato di transizione, quella contenuta nella teoria di Ramsey, concernente il passaggio di un mezzo elastico da una fase molecolare ad una fase metallica, per raggiunto limite della pressione critica.

Poiché, fino a qualche anno fa, la discontinuità di Wiechert era considerata brusca — un salto improvviso nel campo elastico e in quello della densità —, per sostenere la sua ipotesi relativa al mutamento di fase per pressione (senza cambiamenti di natura chimica), Ramsey era stato costretto a postulare per il basso mantello l'esistenza di un mezzo chimicamente omogeneo (« The core discontinuity may . . . be tentati-

vely attributed to the excitation of the molecule SiO_2 » — pag. 421 di «On the Nature of the Earth's core» (11). Qualsiasi altra ipotesi, porta all'esistenza di uno strato di transizione, sia nel caso di mutamenti nella composizione chimica (pag. 415 l.c.), sia se si ritiene la gravità come fattore determinante: in questo caso, infatti, secondo Ramsey, non si avrebbe un salto brusco nella densità («jump in density»), ma un graduale aumento per lo spessore di 300 km almeno (pag. 415 l.c.). Sempre nell'ipotesi dell'esistenza di una superficie di discontinuità alla base del mantello, Ramsey era stato condotto ad escludere la possibilità, suggerita da qualche geochimico, sull'esistenza di uno strato di solfuri metallici alla base del mantello. In contrasto con i dati sismici — dice Ramsey a pag. 423 l.c. —, «there should be two reflections, one at the top of the layer and one at the bottom. It is also impossible to explain the anomaly (just outside the core) as a mixing of the materials of the core and the mantle; this would be in contradiction with the observed sharpness of the boundary».

Del resto, la presunta esistenza di una superficie di discontinuità fra mantello e nucleo, ha costituito un valido argomento anche per gli avversari della teoria di Ramsey. Una volta provato — come sostengono Birch e numerosi geochimici — che il mantello è costituito da un sistema a più componenti (probabilmente, secondo Birch, ossidi compatti di magnesio, silicio e ferro), appariva insostenibile un mutamento di fase per alta pressione sotto forma di brusca discontinuità. «A phase change in a multicomponent system almost certainly will be spread out over a range of pressures, whereas the core-mantle boundary presents a very sharp discontinuity» (12).

Il sospetto che la discontinuità fra mantello e nucleo non fosse una superficie matematica era già stato espresso da Sezawa e Kanai nel 1935, al termine di un notevole lavoro sulla trasmissione e riflessione delle onde elastiche (13). Essi osservano che «the discontinuity that forms the boundary of the earth's core, instead of having a geometrical sharp surface as imagined, is more than likely to be such that the intermediate layer will have a certain effective thickness, ...».

Più recentemente, Bullard e Griggs (14), in uno studio sulla discontinuità di Mohorovičić, concludono «that the transition should not be sharp in a rock which is not composed of a single well defined chemical substance».

In ogni modo, sulla base di quanto ho esposto nel citato lavoro del 1964, e delle ulteriori testimonianze qui riportate, non solo la zona di transizione fra mantello e nucleo esiste, ma probabilmente è, a sua volta,

stratificata, come sembrano provarlo i numerosi echi che da essa provengono (Vedi Figg. 1-4).

Come si sono formati? Mi sembra che la teoria di Ramsey sia ancora la più idonea a spiegarlo.

Si sa che, quando un gas è portato allo stato solido, le sue molecole si distribuiscono ordinatamente in un reticolo cristallino. La loro possibilità di movimento viene, in conseguenza, ridotta ad un volume molto ristretto intorno alla posizione relativa al reticolo stesso. A pressioni maggiori, i legami molecolari si rompono e il reticolo viene occupato da atomi, anziché da molecole. Lo stato solido alle alte pressioni può quindi passare dalla fase molecolare alla fase atomica, detta anche metallica.

Non mi soffermerò naturalmente su questioni inerenti alla struttura della materia, anche perchè non rientra nelle mie competenze. È noto che un metallo di volume V può essere considerato come una scatola di ugual volume contenente N elettroni. Per il principio di esclusione di Pauli, soltanto due di questi elettroni possono sussistere in ogni stato previsto dall'equazione dei livelli energetici della scatola in questione. Tutti questi elettroni tendono a raccogliersi, nel più basso stato di energia, formando il così detto gas di Fermi (*). Gli N elettroni occuperanno *tutti gli stati energetici*, dallo stato più basso allo stato di energia cinetica KE_0 , detto livello di Fermi:

$$KE_0 = \frac{h^2}{8m} \left(\frac{3}{\pi} N \right)^{2/3},$$

dove h è la costante di Plank, m la massa ed N il numero di elettroni liberi per centimetro cubico.

Lo studio della relazione pressione-densità della materia nelle cennate condizioni è ricondotto alla ricerca della relazione pressione-volume molecolare o atomico, la densità essendo strettamente legata a quest'ultimo. Dopo la fondamentale ricerca di Krönig, De Boer e Korringa (1946), su questa strada si è messo, come è noto, Ramsey, il quale è giunto alla conclusione che l'olivina, alla base del mantello, si trova nelle condizioni di pressione atte a provocarne il passaggio dalla fase molecolare alla fase atomica (metallica).

In un solido composto da joni con livelli saturati (reticolo cristallino), al crescere della pressione si raggiunge un valore critico per il

(*) Vedi p. es. (15).

quale il lavoro delle forze che tendono a comprimere il solido nello stato più denso, uguaglia quello richiesto dalla rottura dei legami elettronici.

Naturalmente, dopo il primo passaggio alla nuova densità, non è detto che il solido sia stabile per qualsiasi pressione maggiore di quella critica. Se con un determinato valore della pressione si sono spezzati i legami fra elettroni dei livelli occupati più esterni, aumentando ulteriormente, la pressione P raggiungerà un nuovo valore critico, con conseguente ripetizione del processo accennato, sicché la relazione pressione-densità avrà un andamento analogo a quello schematizzato nella Fig. 7.

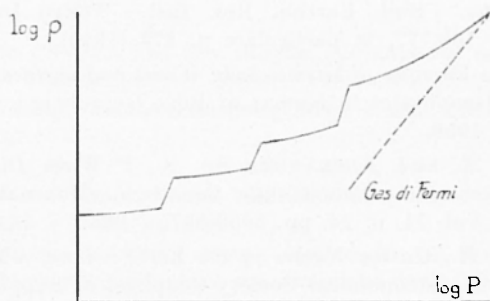


Fig. 7

Quando la pressione raggiunge un valore talmente elevato, capace di privare di elettroni tutti i livelli elettronici, abbiamo la formazione del gas di Fermi.

In un sistema a più componenti, il processo sommariamente accennato, spiega la formazione della zona di transizione fra mantello e nucleo, nonché la sua probabile stratificazione.

BIBLIOGRAFIA

- (1) CALOI P., *Sulle reali dimensioni del nucleo terrestre*, « Rend. Acc. Naz. dei Lincei » (Classe Sc. fis. mat. e nat.), ser. VIII, Vol. XXXVI, fasc. 7 (1964).
- (2) CALOI P., *On the Upper Mantle*, in « Advances in Geophysics », Vol. 12, Academic Press, New York (in preparazione).
- (3) CALOI P., *Sulla velocità di propagazione delle onde longitudinali alla base del mantello terrestre*, « Rend. Acc. Naz. dei Lincei » (Classe Sc. fis. mat. e nat.), ser. VIII, Vol. XXXII, fasc. 2 (1962).
- (4) HONDA H., *On the ScS waves and the rigidity of the Earth's core*. « The Central Meteorological Observatory » pp. 165-177 (1934).

- (5) HONDA H. and HASAYA Y., *On the ScS waves and the rigidity of the Earth's core (Second paper)*. «The Central Meteorological Observatory » pp. 219-230 (1940).
- (6) HONDA H. and ITO H., *On the reflected waves from deep focus earthquakes*. «The Science Reports of the Tohoku University », *Series 5, Geophysics*, Vol. 3, n. 3, pp. 144-155 (1951).
- (7) HONDA H., SIMA H. and NAKAMURA K., *The ScS waves, the mechanism of deep earthquake and rigidity of the earth's core*. «The Science Reports of the Tohoku University ». *Series 5, Geophysics*, Vol. 7, n. 3, pp. 170-179 (1956).
- (8) SEZAWA K. and KANAI K., *Viscosity distribution within the Earth. Preliminary Notes*. «Bull. Earthq. Res. Inst.» Tokyo Imp. Univ., Vol. XVIII, pp. 169-177, in particolare p. 173 (1940).
- (9) BATH M., *The Energies of seismic body Waves and surface Waves* «Contributions in Geophysics in honour of Beno Gutenberg». pp. 1-16. Pergamon Press, 1958.
- (10) PHINNEY R. A. and ALEXANDER SH. S., *P Wave Diffraction Theory and Structure of the Core-Mantle Boundary*, «Journal of Geophysical Research», Vol. 71, n. 24, pp. 5959-5975 (1966).
- (11) RAMSEY W. H., *On the Nature of the Earth's Core*, «Monthly Notices of the Royal Astronomical Society-Geophysical Supplement», Vol. 5, n. 9 (1949).
- (12) JACOBS J. A., *The Earth's Core and Geomagnetism*, Pergamon Press, London (1963), p. 25.
- (13) SEZAWA K. and KANAI K., *The Effect of Sharpness of Discontinuities on the Transmission and Reflection of Elastic waves*. «Bull. Earthq. Research Institute», Tokyo Imp. University, Vol. XIII, n. 4, p. 755 (1935).
- (14) BULLARD E. C. and GRIGGS D. T., *The Nature of the Mohorovicic Discontinuity*, «Geophys. Journ. of the Royal Astr. Soc.», Vol. 6, n. 1, pp. 118-123 (1961).
- (15) OREAR J., *Fundamental Physics*, Cap. 13 «Atomic Theory». John Wiley, New York (1963).
-