
ATTI ACCADEMIA NAZIONALE DEI LINCEI
CLASSE SCIENZE FISICHE MATEMATICHE NATURALI
RENDICONTI

PIETRO CALOI

**La zona di transizione fra Mantello e Nucleo
terrestri: sua stratificazione, sua probabile origine**

*Atti della Accademia Nazionale dei Lincei. Classe di Scienze Fisiche,
Matematiche e Naturali. Rendiconti, Serie 8, Vol. 42 (1967), n.5, p. 573–579.*

Accademia Nazionale dei Lincei

<http://www.bdim.eu/item?id=RLINA_1967_8_42_5_573_0>

L'utilizzo e la stampa di questo documento digitale è consentito liberamente per motivi di ricerca e studio. Non è consentito l'utilizzo dello stesso per motivi commerciali. Tutte le copie di questo documento devono riportare questo avvertimento.

*Articolo digitalizzato nel quadro del programma
bdim (Biblioteca Digitale Italiana di Matematica)
SIMAI & UMI*

<http://www.bdim.eu/>

RENDICONTI

DELLE SEDUTE

DELLA ACCADEMIA NAZIONALE DEI LINCEI

Classe di Scienze fisiche, matematiche e naturali

Seduta del 13 maggio 1967

Presiede il Presidente BENIAMINO SEGRE

NOTE DI SOCI

Geofisica. — *La zona di transizione fra Mantello e Nucleo terrestri: sua stratificazione, sua probabile origine.* Nota (*) del Socio PIETRO CALOI.

SUMMARY. — New evidence about the existence of a transition zone between the lower mantle and the core is presented.

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

The zone appears layered, as the record of intervalled, successive pulses proves.

For the justification of this zone the theory of Ramsey is thought appropriate.

1. In una Nota presentata fra questi Atti 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 circa. Le onde riflesse dalla base della zona stessa, indicavo con il simbolo intermedio «N» ($P_N P \cdots S_N S$), a significare che essa costituiva l'effettivo inizio del «Nucleo».

La validità di quelle conclusioni è dimostrata dalle nuove testimonianze che qui presento (vedi Tavole I, II, III).

(*) Presentata nella seduta dell'8 aprile 1967.

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, per esempio, ($S_{N1}S \dots S_N S$) 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 $S_N S$. 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^s-15^s; 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 esempio).

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 (Tavole I e III), 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 perché le onde ScP siano di piccolissima ampiezza (solo la componente SV può trasformarsi infatti in onde P), mentre l'ampiezza delle PcS è sempre più marcata perché le P, cambiando carattere nella riflessione, possono mutarsi soltanto in SV (Tav. I b).

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

Si potrà osservare che la differenza $S_N S - S_c S$, 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, per esempio, 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 pressoché normalmente, in quanto si verifica, nella propagazione verso il basso, un progressivo avvicinamento alla normale nel punto d'incidenza. A questo riguardo, dev'esser 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 Tav. I g), Tolmezzo).

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

Si è visto che il valore reale della velocità v_c alla base del mantello può ottenersi dalla formula [2]:

$$v_c = \frac{r_c}{r_0} V,$$

dove r_c è il raggio medio dello strato - base del mantello, r_0 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 [2] 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

$$V = 25 \text{ Km/sec circa}$$

Fatto $r_c = 3300 \text{ Km}$, $r_0 = 6370 \text{ Km}$, la (1) dà

$$v_c = 12,95 \text{ Km/sec circa.}$$

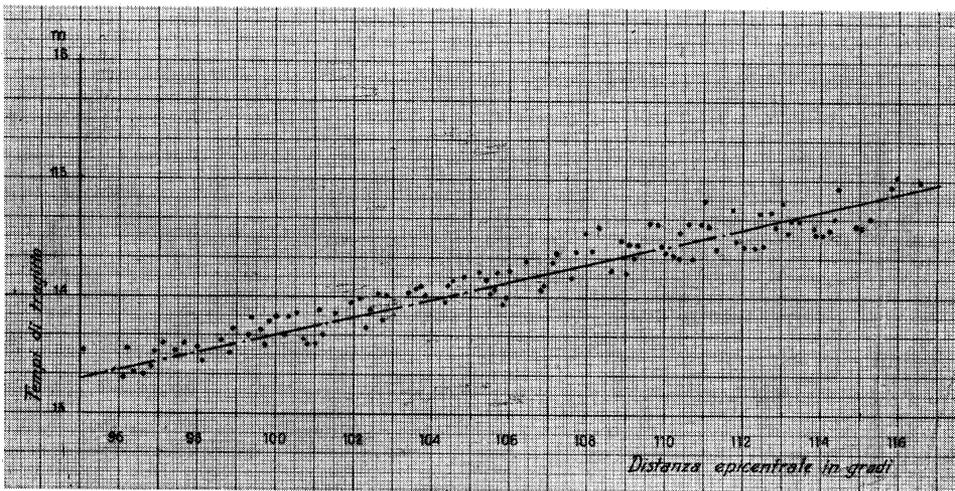


Fig. 1.

Un'ulteriore applicazione a 113 valori per le P (fig. 1) 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 ,

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

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 evitare confusione con altre onde, comunque influenzate dal nucleo.

La media dei sei risultati, separatamente ottenuti, è stata la seguente:

$$V = 21,73 \text{ Km/sec} \quad , \quad v_c = 11,26 \text{ Km/sec,}$$

mentre l'elaborazione complessiva delle cennate P, relative agli stessi terremoti, ha condotto a

$$V = 21,43 \text{ Km/sec} \quad , \quad v_c = 11,10 \text{ Km/sec.}$$

Il valore così ottenuto per v_c è quindi alquanto inferiore al valore di 13,75 Km/sec, che tale velocità 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. 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 [3].

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 tentatively attributed to the excitation of the molecule SiO_2 » - pag. 421 di *On the Nature of the Earth's core* [4]). Qualsiasi altra ipotesi, porta all'esistenza di uno strato di transizione, sia nel caso di mutamenti nella composizione chimica (p. 415 loc. cit.), 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 (p. 415 loc. cit.). 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 p. 423 loc. cit. -, « 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 avvesari 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 » [5].

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 [6]. 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 [7], 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 Tavole I-III).

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 perché 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 ⁽¹⁾. Gli N elettroni occuperanno *tutti gli stati energetici*, dallo stato più basso allo stato di energia cinetica KE_0 , detto livello di Fermi,

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

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

(1) Vedi per esempio [8].

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

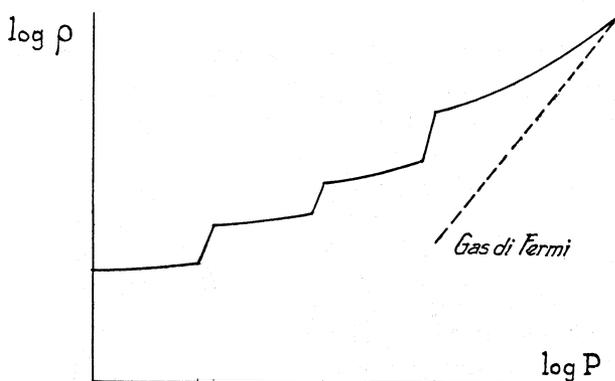
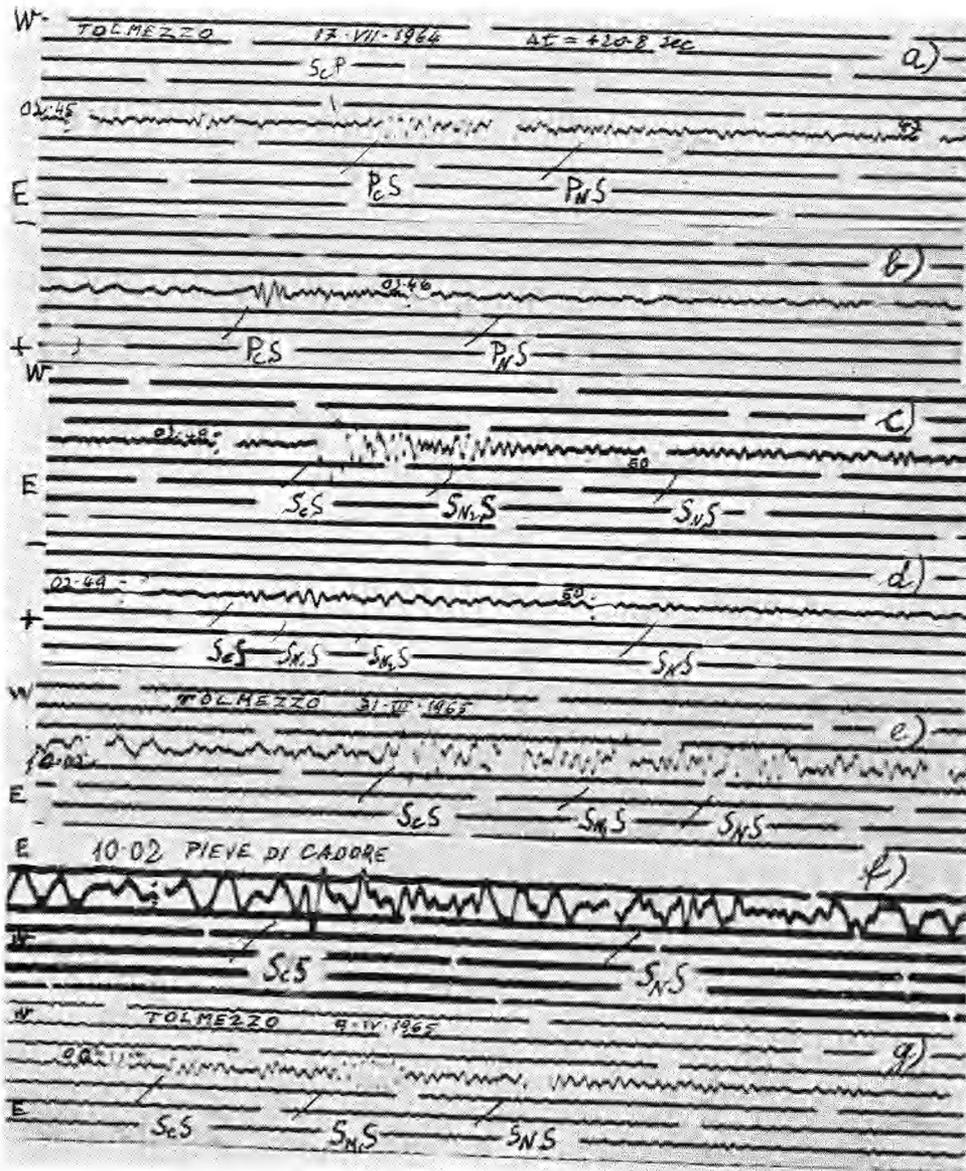


Fig. 2. Relazione schematica fra pressione (P) e densità (S).

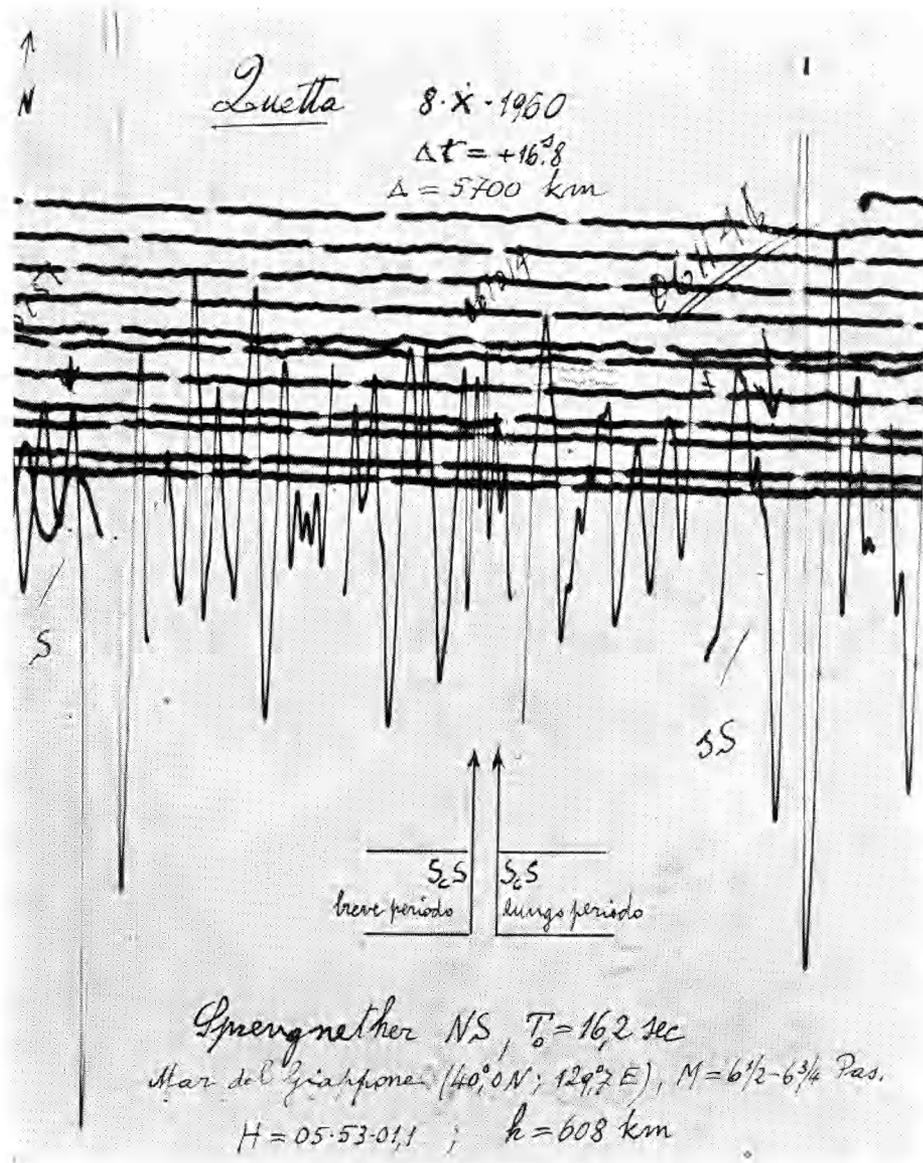
Naturalmente, dopo il primo passaggio alla nuova densità, non è detto che il solido sia stabile per qualsiasi pressione maggiore di quella critica. Se con un determinato valore della pressione si sono spezzati i legami fra elettroni dei livelli occupati più esterni, aumentando ulteriormente la pressione 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. 2.

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.

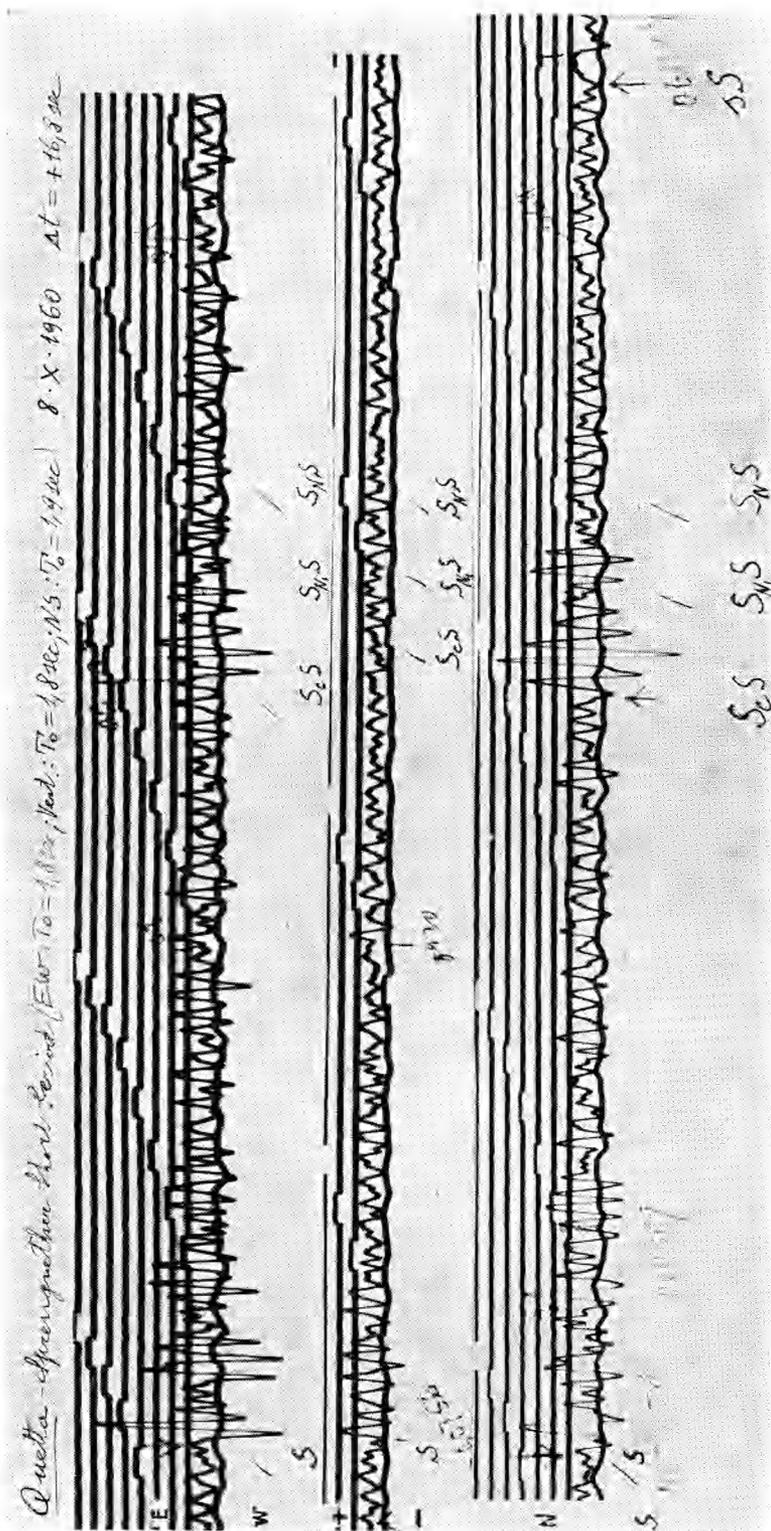


17 luglio 1964 (Grecia: $38^{\circ}, 2' N$; $23^{\circ}, 7' E$ - $H = 02.34.26,9$; $h = 150$ Km): a) b) c) d) registrazioni di Tolmezzo ($\Delta = 1,300$ Km): per le onde miste, sulla comp. vert. appare netta la sola PcS (vedi b). La ScS , molto ampia sulla comp. orizz., sembra avere predominanti i caratteri di SH : manca infatti il suo inizio sulla comp. vert.: negli impulsi successivi (S_{N1S}, \dots), appaiono chiari invece i caratteri della SV (vedi d). - 31 marzo 1965 (Grecia: $38^{\circ}, 4' N$; $22^{\circ}, 2' E$; $M = 6 \frac{3}{4}$ Pas.; $H = 09.47.29$; $h = 100$ Km circa): e) registrazione di Tolmezzo, $\Delta = 1165$ Km.; f) registrazione di Pieve di Cadore, $\Delta = 1200$ Km. - 9 aprile 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.



Terremoto Mar del Giappone (40°, 0 N; 129,7 E).

Registrazione di Quetta (NS Sprengnether 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^s,2. Le componenti Sprengnether a breve periodo (T₀ = 1^s,8) della stessa stazione, registrano invece, in maniera predominante, soprattutto le ScS...S_NS con periodo di 3^s circa (ved. Tav. III).



Terremoto del Mar del Giappone (8 ottobre 1960), registrazioni di Quetta, su componenti Sprengnether a breve periodo.

Sugli apparecchi a breve periodo, le $S_1S, \dots, S_N S$ - con periodi dell'ordine di 3^s - 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 S_1S amplissime sulla NS di $16^s, 2$ (ved. Tav. II), con periodo di 12^s circa, mancano, con tale periodo, sulla NS di $1^s, 3$. Solo la S vi figura, con periodo molto più breve. Le $S_1S, \dots, S_N S$ sembrano quindi la risposta libera degli strati della zona di transizione.

BIBLIOGRAFIA.

- [1] P. CALOI, *Sulle reali dimensioni del nucleo terrestre*, « Rend. Acc. Naz. dei Lincei » (Classe Sc. fis. mat. e nat.), ser. VIII, vol. XXXVI, fasc. 6 (1964).
- [2] P. CALOI, *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).
- [3] ROBERT A. PHINNEY e SHELTON S. ALEXANDER, *P Wave Diffraction Theory and Structure of the Core-Mantle Boundary*, « Journal of Geophysical Research », vol. 71, n. 24, pp. 5959-5975 (1966).
- [4] W. H. RAMSEY, *On the Nature of the Earth's Core*, « Monthly Notices of the Royal Astronomical Society-Geophysical Supplement », 5, n. 9 (1949).
- [5] J. A. JACOBS, *The Earth's Core and Geomagnetism*, Pergamon Press, London (1963), p. 25.
- [6] K. SEZAWA e K. KANAI, *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).
- [7] E. C. BULLARD e D. T. GRIGGS, *The Nature of the Mohorovičić Discontinuity*, « Geophys. Journ. of the Royal Astr. Soc. », vol. 6, n. 1, pp. 118-123 (1961).
- [8] J. OREAR, *Fundamental Physics*, Cap. 13 « Atomic Theory », John Wiley, New York (1963).