
ATTI ACCADEMIA NAZIONALE DEI LINCEI
CLASSE SCIENZE FISICHE MATEMATICHE NATURALI

RENDICONTI

PIETRO CALOI, PIER FRANCESCO BIAGI

Sulla stratificazione della zona di transizione fra mantello e nucleo

*Atti della Accademia Nazionale dei Lincei. Classe di Scienze Fisiche,
Matematiche e Naturali. Rendiconti, Serie 8, Vol. 56 (1974), n.5, p. 752–760.*

Accademia Nazionale dei Lincei

<http://www.bdim.eu/item?id=RLINA_1974_8_56_5_752_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/>

Geofisica. — *Sulla stratificazione della zona di transizione fra mantello e nucleo.* Nota di PIETRO CALOI e PIER FRANCESCO BIAGI, presentata (*) dal Socio P. CALOI.

SUMMARY. — We prove by new documentary evidence the stratification of the transition zone between the terrestrial mantle and the core.

We determine the average values of the thickness of strata. These thicknesses are variable and also the bending of the delimitative boundaries is variable. That is why we suppose that the lower mantle is not quite homogeneous.

1. Uno di noi, già nel 1964 [1], era giunto alla conclusione 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 — contrariamente a quanto si riteneva precedentemente — non confina bruscamente col nucleo esterno, ma ne è separato da una zona di transizione, caratterizzata da velocità decrescenti delle onde longitudinali e trasversali. Lo spessore di detta zona, veniva indicato in 160 km circa. In due Note successive [2, 3] veniva provato che la zona in questione si presenta generalmente stratificata, com'è testimoniato dagli echi, che provengono da superficie intermedie fra la superficie «C» (base del mantello) e quella che veniva indicata con «N» (base della zona di transizione ed effettivo inizio del nucleo esterno).

In dette Note si tentava altresì una spiegazione dell'origine di detta zona e della sua stratificazione.

2.1. Prescindendo, per ora, dai problemi connessi alla natura fisica della zona di transizione fra mantello e nucleo, ci siamo preoccupati di valutare lo spessore medio delle sue principali stratificazioni, basandoci su vecchie e nuove testimonianze.

Dal complesso dei casi esaminati, si riscontra generalmente la presenza di quattro superficie di discontinuità: « α », « β », « γ », « δ ». Diciamo «generalmente», perchè — come diremo più oltre — si presentano evidenti anomalie, che possono essere interpretate come scostamenti sensibili dalla presunta sfericità della superficie di Wiechert-Gutenberg «C» e delle successive.

Valendoci dei dati in precedenza ottenuti [2, 3], abbiamo scelto come velocità media delle onde longitudinali negli strati $\alpha\alpha$, $\alpha\beta$, $\beta\gamma$... i seguenti valori

$$\begin{array}{lll} v_{1\alpha\alpha} = 13 \text{ km/sec} & v_{1\alpha\beta} = 12,3 \text{ km/sec} & v_{1\beta\gamma} = 11,6 \text{ km/sec} \\ v_{1\gamma\delta} = 10,9 \text{ km/sec} & v_{1\delta\varepsilon} = 10-10,3 \text{ km/sec.} & \end{array}$$

(*) Nella seduta del 28 maggio 1974.

Esaminiamo brevemente le osservazioni, relative alle onde longitudinali.

Fra i casi nuovi di onde $P_c P$ e associate, provenienti dalla zona di transizione, presentano particolare interesse – per ovvi motivi – quelle provocate dall'esplosione nucleare sotterranea, realizzata da scienziati americani nelle isole Aleutine, il 6 novembre 1971. L'esplosione avvenne nel punto di coordinate

$$51^{\circ}28'18'', 7 \text{ N}; 179^{\circ}06'24'', 3 \text{ E},$$

alla profondità di 1.791 metri e nell'istante

$$22^h 00^m 00^s, 1.$$

Abbiamo esaminato le registrazioni ottenute nelle seguenti stazioni sismiche (di cui si riportano le coordinate geografiche e le distanze epicentrali Δ):

	λ	φ	Δ
Vajont	$12^{\circ}13'44'' \text{ E}$	$46^{\circ}15'58'' \text{ N}$	9090 Km
Pieve di Cadore	$12^{\circ}23'10'' \text{ E}$	$46^{\circ}25'15'' \text{ N}$	9090 Km
Somplago	$12^{\circ}03'40'' \text{ E}$	$46^{\circ}20'22'' \text{ N}$	9100 Km
La Maina	$12^{\circ}44'00'' \text{ E}$	$46^{\circ}26'54'' \text{ N}$	9084 Km

La conoscenza dell'angolo d'incidenza delle onde $P_c P$ sulla superficie « C », per le diverse distanze epicentrali, consente di ottenere – note le velocità medie sopra riportate – gli angoli di rifrazione nelle successive stratificazioni. Ci siamo valse dei valori dei seni degli angoli d'incidenza, calcolati a suo tempo da Gutenberg e Richter, per diverse distanze angolari [4]. Abbiamo scelto per il valore della velocità delle onde longitudinali alla base del mantello $v_c = 13,7 \text{ km/sec}$. Con riferimento alla stazione del Vajont, noti l'angolo d'incidenza delle onde $P_c P$ (72° circa) la velocità delle onde rifratte nello strato α (13 Km/sec circa) e l'intervallo di registrazione fra le $P_c P$ e $P_{\alpha} P$, si ottiene per lo spessore dello strato α il valore

$$h_{\alpha} = 21 \text{ km}.$$

Non staremo a ripetere l'andamento dei calcoli. Sulla base della registrazione abbiamo ottenuto per le altre superficie di discontinuità le seguenti profondità da « C »

$$h_{\beta} = 42 \text{ km}$$

$$h_{\gamma} = 60 \text{ km}$$

$$h_{\delta} = 95 \text{ km}$$

$$h_{\varepsilon} = 130 \text{ km}.$$

Seguono i risultati relativi alle stazioni di Pieve di Cadore, Somplago e La Maina:

	h_{α}	h_{β}	h_{γ}	h_{δ}	h_{ε}
Pieve di Cadore	24 Km	—	63 Km	96 Km	125 Km
Somplago	21 Km	42 Km	—	95 Km	130 Km
La Maina	21 Km	—	65 Km	—	—

Si noterà che, nonostante la relativa vicinanza delle stazioni d'osservazione e l'analogia dei sismografi ivi funzionanti (di tipo «Girlanda»), non tutti gli echi risultano di pari chiarezza, testimonianza di inomogeneità nelle superficie riflettenti.

Riteniamo che quella indicata con « ε » non sia la superficie limitante il nucleo vero e proprio. La successione di treni d'onda che seguono, lascia prevedere che — dove esiste — tale superficie sia a maggiore profondità.

Un caso di un certo interesse è quello del terremoto delle isole Nicobare, del 15 Settembre 1964, con riferimento alla registrazione ottenuta presso la stazione sismica di Tolmezzo alla distanza di 8.530 km. Esso si è verificato nel punto di coordinate 8°9 N; 93°1 E alle ore 15.29.32, alla profondità di 37 km circa.

Dall'esame della componente verticale, risultano di piccola ampiezza le P_cP e $P_{\alpha}P$, come se le corrispondenti superficie riflettenti manifestassero un'eccessiva «trasparenza», mentre appaiono nettamente registrate le $P_{\beta}P$, $P_{\gamma}P$, $P_{\delta}P$, $P_{\varepsilon}P$... Tenendo conto di un angolo d'incidenza per le P_cP di 69° circa, si perviene ai seguenti valori per le profondità delle superficie riflettenti da «C»:

$$h_{\beta} = 40 \text{ km}$$

$$h_{\gamma} = 65 \text{ km}$$

$$h_{\delta} = 91 \text{ km}$$

$$h_{\varepsilon} = 129 \text{ km.}$$

Ma come in altri casi, la $P_{\varepsilon}P$ non appare come l'ultimo eco della zona di transizione, che probabilmente termina una trentina di km più sotto, come testimoniano le registrazioni.

Ci siamo preoccupati di trovare qualche esempio, che consentisse di valutare quale delle superficie interne si presentasse la più continua, capace, di riflettere un ritorno delle onde associate alle P_cP .

Netta, a questo riguardo, si è presentata la registrazione, ottenuta a Tolmezzo, alla distanza di 15.840 km, del terremoto delle Nuove Ebridi, verificatosi nel punto 15°30' S; 167°36' E, alla profondità di 121 km circa, alle 16.39.49,3 del 10 luglio 1964 (con magnitudo, secondo Pasadena, di 7 1/2).

Chiari sono i ritorni delle P_cP e $P_\alpha P$, indicati nella fig. 3 con $(P_cP)_2$ e $(P_\alpha P)_2$ avendo compiuto un tragitto conforme a quello schematizzato nella fig. 4. Anche in questo caso, lo spessore dello strato α per un angolo d'incidenza della P_cP dell'ordine di 69° risulta di 21 km, uguale quindi a quello ottenuto nelle precedenti registrazioni.

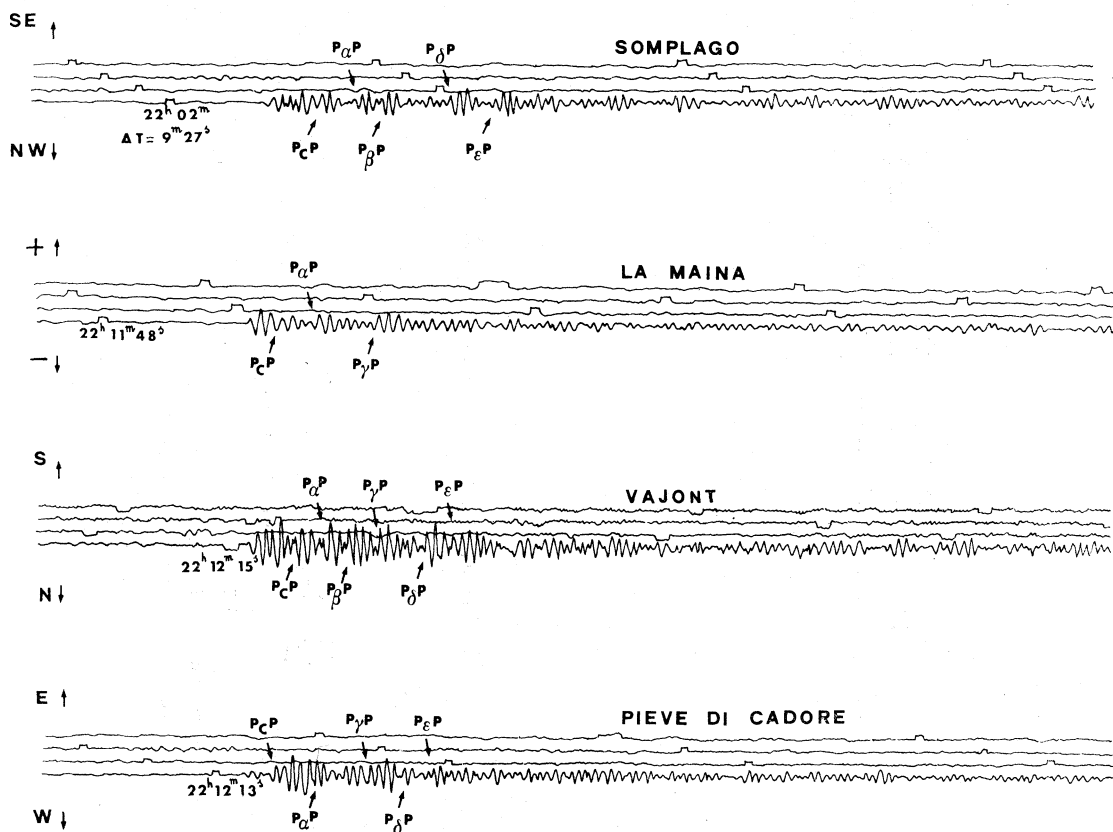


Fig. 1. - Esempi di riflessione dalla superficie « C » (base del mantello) e dalla superficie interne della zona di transizione mantello-nucleo (« C »...« N »), in occasione dell'esplosione nucleare sotterranea delle isole Aleutine del 6 novembre 1971.

La prima discontinuità della zona di transizione appare quindi la più continua e può chiaramente riflettere il ritorno della corrispondente $P_\alpha P$. La lunga coda di oscillazioni, che dura oltre un minuto, sta a significare che anche le superficie successive conservano un buon potere di restituzione e che comunque una discreta percentuale di energia sismica viene catturata, convogliata e diffusa dalla zona di transizione.

2.2 Siamo quindi passati ad esaminare anche registrazioni di onde S_cS e fasi associate, provenienti dall'interno della zona di transizione.

Ottime registrazioni al riguardo sono state registrate a Quetta alla distanza epicentrale di 5.700 km circa, in occasione del terremoto del Mar del Giappone

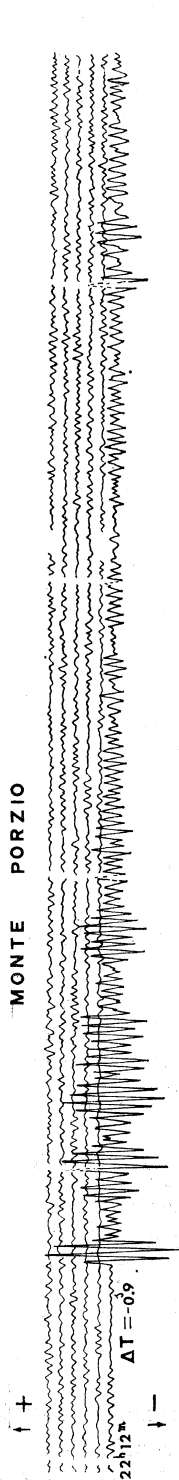


Fig. 2. - A Monte Porzio ($\Delta = 9600$ km circa), l'esplosione nucleare sottomarina delle Aleutine, non ha provocato la registrazione di effettive onde $P_c P$, mentre appaiono molto sviluppate le onde ad esse associate ($\alpha, \beta, \gamma, \dots$); testimonianza di sensibile variazione nella curvatura della base del mantello, in corrispondenza della zona dove avrebbe dovuto verificarsi la riflessione.

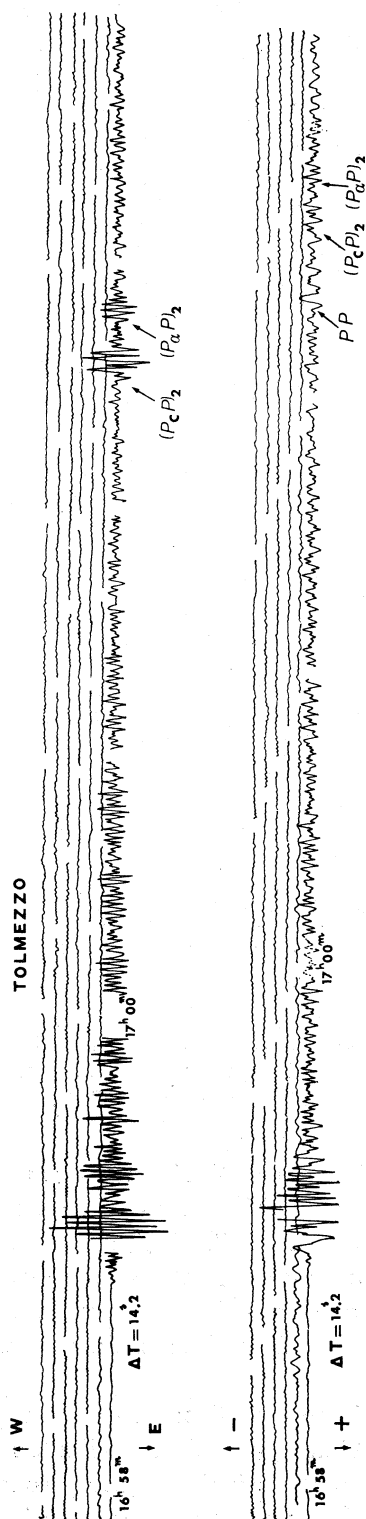


Fig. 3. - Onde $P_c P$ e associate ($\alpha, \beta, \dots$), dopo due riflessioni alla base del mantello (come da fig. 4). La lunga serie di oscillazioni del minuto 17.03, si spiega con l'esistenza di onde convogliate dalla zona di transizione.

($40^{\circ},0$ ON; $129^{\circ},7$ E) verificatosi alla profondità di 608 km circa l'8 ottobre 1960 [2, 3].

La graduatoria delle velocità delle onde trasversali negli strati, che seguono la superficie «C», è stata scelta come di seguito:

$$\begin{aligned} v_{2\alpha} &= 6,9 \text{ km/sec} & v_{2\alpha\beta} &= 6,4 \text{ km/sec} & v_{2\beta\gamma} &= 5,9 \text{ km/sec} \\ v_{2\gamma\delta} &= 5,4 \text{ km/sec} & v_{2\delta\varepsilon} &= 5,0 \text{ km/sec}. \end{aligned}$$

Come si può dedurre dalla fig. 5 la superficie « α » ha risposto insieme a «C» e pure unitaria è stata la risposta delle superfici « β » e « γ ». La superficie « ε » per un angolo d'incidenza $i_c = 17^{\circ}$ circa risulta alla profondità di 125 km circa.

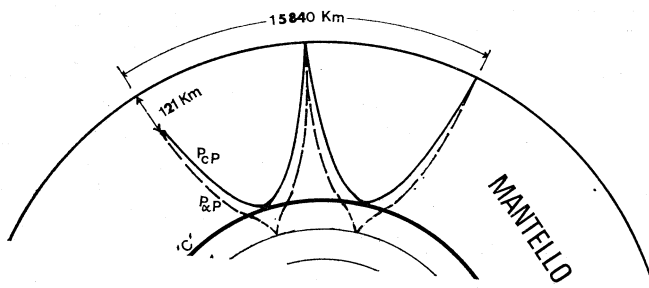


Fig. 4. — Proporzioni fortemente alterate.

Anche parecchi terremoti provenienti dall'Egeo hanno fornito chiari esempi di onde S_cS ed associate [2, 3]. Anche fra essi appare frequente il caso di uno strato che risponde alla sollecitazione elastica, più che la riflessione sulle superficie limiti.

Si veda la registrazione ottenuta a Tolmezzo il 17 luglio 1964, relativa al terremoto verificatosi nel punto $38^{\circ},2$ N; $23^{\circ},7$ E alla profondità di 150 km circa, nell'istante 02.34.26,9. Lo strato $\alpha\beta$ risponde con un gruppo di oscillazioni a circa $9^{\circ},3$ dall'inizio delle S_cS .

La profondità della superficie « γ » da cui proviene una eco dopo $18^{\circ},6$ dalle S_cS , risulta di 58 km circa.

Segue un gruppo che può essere attribuito allo strato $\delta\varepsilon$ mentre la «N» potrebbe essere rivelata dall'inizio del treno d'onde del minuto 03.50 e risultare pertanto alla profondità media di 155 km circa. La lunga coda che segue, testimonia della cattura di energia da parte della zona di transizione, in essa convogliata e quindi diffusa.

Naturalmente, attesa la piccola distanza epicentrale (1570 km circa) l'incidenza, quasi normale a «C» non porta a correzioni apprezzabili del tragitto nell'interno degli strati.

In occasione di un altro terremoto proveniente dal Mar della Grecia ($35^{\circ},4$ N; $24^{\circ},1$ E) dove si è verificato il 10 aprile 1965, ad ore 23.57.08, alla profondità di 80 km circa, si è ottenuto a Tolmezzo, alla distanza di 1800 km circa, una registrazione, che può ritenersi in parte anomala, in quanto in essa appare particolarmente ampia la risposta dello strato $\gamma\delta$. Sulla base di detta

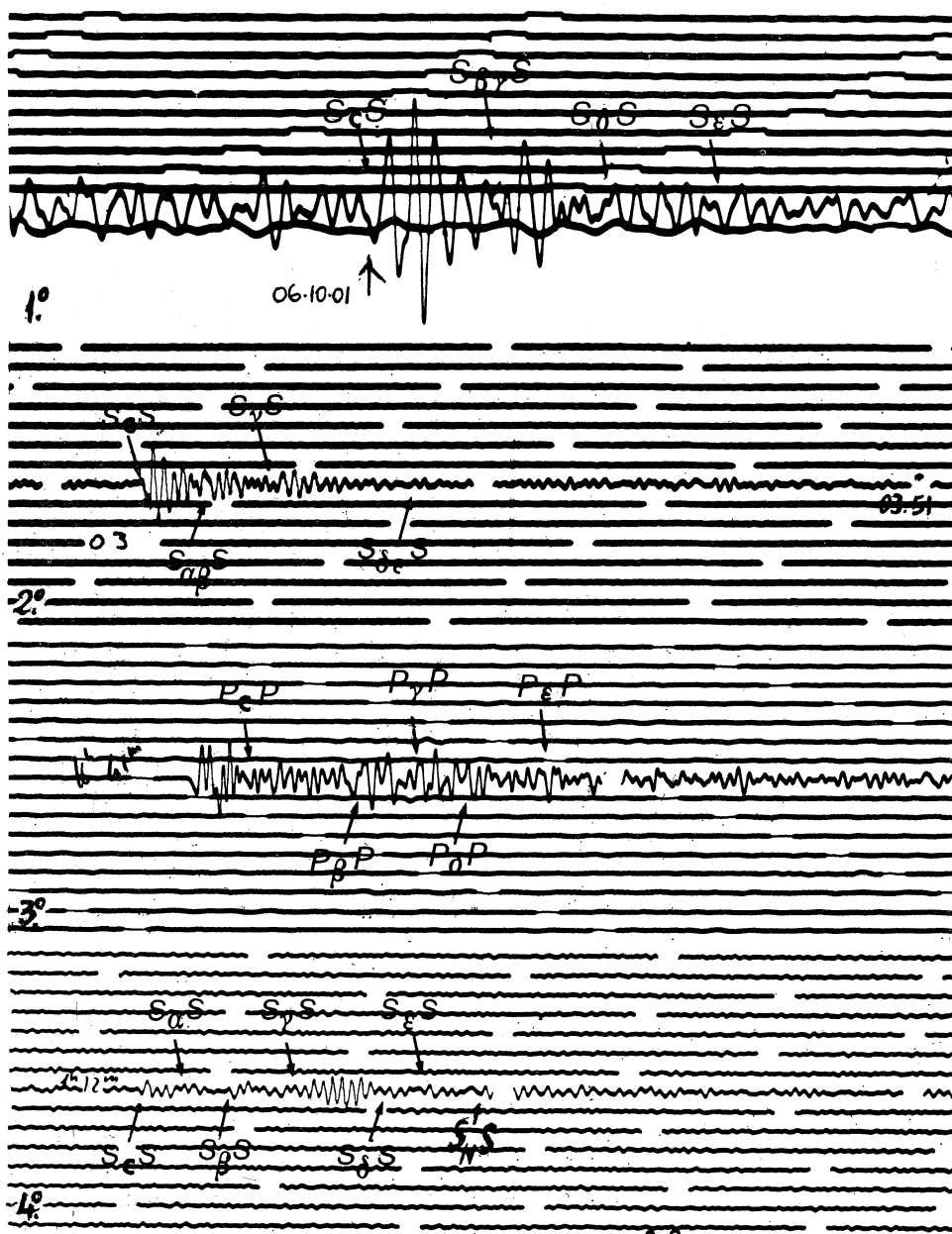


Fig. 5. - 1) Onde $S_c S$ ed associate, riflesse dalla superficie «C», e successive nella zona di transizione, registrate a Quetta, alla distanza di 5670 km circa, l'8 ottobre 1960 [1, 3]; 2) Terremoto dell'Attica del 17 luglio 1964, registrato a Tolmezzo, alla distanza di 1200 km circa [1, 3]. La superficie «N» appare rivelata dal seguito d'onde che principia con il minuto 30.mo; 3) Registrazione della verticale di Tolmezzo di onde $P_c P$ ed associate, in occasione del terremoto delle isole Nicobare del 15 settembre 1964, alla distanza di 8200 km circa [1, 3]. Le superficie «C» e « α » si presentano alquanto «trasparenti», mentre nette sono le risposte di « β », « γ », « δ » e « ϵ ». L'impeto a 16.41.06 può ritenersi come risposta elastica della superficie «N», a circa 160 km dalla «C»; 4) Terremoto a Sud di Creta del 10 aprile 1965, registrato a Tolmezzo, a circa 1800 km [1, 3]. La discontinuità più efficace, ai fini della riflessione, appare la « γ », indice di inomogeneità nel complesso della zona di transizione che termina probabilmente a 155 km circa da «C», come prova l'impulso a 12^m 58^s.

registrazione (fig. 5) la successione delle superficie riflettenti è stata di 21 km, 43 km, 66 km, 105 km e 124 km rispettivamente dalla base «C» del mantello. L'impulso che figura alla fine del minuto 12° può essere interpretato come proveniente dalla superficie «N», limitante il nucleo, ad una profondità di circa 150 km da «C».

3. Riteniamo superfluo insistere con altri esempi.

Dove la zona di transizione appare completa, si riscontrano in essa discontinuità, che, in media, distano dalla base del mantello «C» secondo la sequenza:

α 21 km $\pm$ 2 km

β 42 km $\pm$ 2 km

γ 63 km $\pm$ 4 km

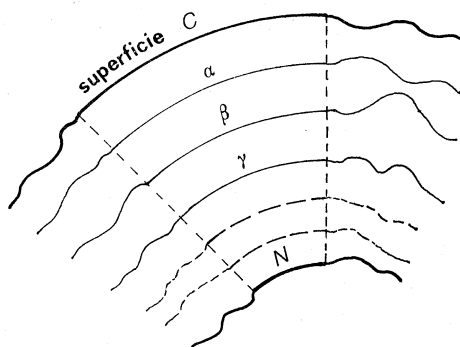
δ 95 km $\pm$ 9 km

ϵ 128 km $\pm$ 3 km.

La « ϵ » non è però l'inizio del nucleo; la superficie «N» da cui il nucleo esterno è limitato dista dalla «C» di 150–160 km circa.

Ad un risultato analogo (150 km) è giunto di recente – seguendo altra via – anche K. Ergin [5]. Giustamente egli ritiene però che questo debba essere considerato un valore massimo, potendo lo spessore della zona di transizione variare da luogo a luogo.

Fig. 6. – La zona di transizione fra mantello e nucleo come viene schematizzata (parte centrale del disegno) e come potrebbe in realtà essere (parti laterali). – Proporzioni fortemente alterate.



Ciò è senz'altro provato dalle anomalie che si riscontrano nelle registrazioni, di alcune delle quali abbiamo fatto cenno nei numeri precedenti. In corrispondenza di certe distanze, sembra mancare la riflettente « α » oppure la « β » o riflettenti successive.

Può anche avvenire che la «C» dia risposte ritardate, come appare dalla registrazione della verticale a breve periodo di Monte Porzio (fig. 2), relativa all'esplosione nucleare sotterranea delle Aleutine. In altri termini la «C» può discostarsi più o meno sensibilmente dalla forma sferica e presentare variazioni di curvatura più o meno accentuate. In ogni caso, la presenza di un lungo seguito di onde catturate e convogliate dalla zona di transizione, anche per grandi distanze epicentrali (figg. 1, 2) lascia prevedere che lo spessore di detta zona non sia mai inferiore a qualche diecina di km.

Se si ritiene valida l'ipotesi che la stratificazione della zona di transizione fra mantello e nucleo sia da attribuire al passaggio dalla fase molecolare alla fase metallica del sistema a più componenti costituente la base del mantello [2, 3], le irregolarità osservate nell'andamento delle superficie di discontinuità (o la mancanza di taluna di queste ultime), sarebbero da attribuire alla non uniformità di costituzione chimica del sistema accennato, nel senso che le sue componenti verrebbero a presentarsi alla base del mantello, con variazioni di composizione, da luogo a luogo, tali da accelerare o ritardare o ridurre di numero la formazione delle discontinuità per pressione. Il che, attesa la natura del corpo terrestre, appare senz'altro accettabile.

BIBLIOGRAFIA

- [1] P. CALOI (1964) - *Sulle reali dimensioni del nucleo terrestre*, « Rend. Acc. Naz. dei Lincei », Cl. Sc. fis., mat. e nat., ser. VIII, 36 (7).
- [2] P. CALOI (1967) - *La zona di transizione fra Mantello e Nucleo terrestri: sua stratificazione, sua probabile origine*, « Rend. Acc. Naz. dei Lincei », Cl. Sc. fis. mat. e nat., sez. VIII, 42 (5).
- [3] P. CALOI (1967) - *La zona di transizione fra mantello e nucleo terrestri è stratificata: sua probabile origine*, « Annali di Geofisica », 20 (1).
- [4] B. GUTENBERG e C. F. RICHTER (1939) - *On seismic Waves* (Fourth paper), 94-136, « Gerlands Beiträge zur Geophysik », 54.
- [5] K. ERGIN (1972) - *Observed travel times of P for $\Delta > 80^\circ$ and the nature of Mantle-Core boundary*, XIII General Assembly of ESC.