
ATTI ACCADEMIA NAZIONALE DEI LINCEI
CLASSE SCIENZE FISICHE MATEMATICHE NATURALI
RENDICONTI

PIETRO CALOI

**Sulle notevoli conseguenze dell'esistenza di una zona
di transizione fra Mantello e Nucleo terrestri**

*Atti della Accademia Nazionale dei Lincei. Classe di Scienze Fisiche,
Matematiche e Naturali. Rendiconti, Serie 8, Vol. 59 (1975), n.3-4, p.
263-271.*

Accademia Nazionale dei Lincei

<http://www.bdim.eu/item?id=RLINA_1975_8_59_3-4_263_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. — *Sulle notevoli conseguenze dell'esistenza di una zona di transizione fra Mantello e Nucleo terrestri.* Nota (*) del Socio PIETRO CALOI.

SUMMARY. — A further contribution is carried to the knowledge of the characteristics of the layered transition zone between Earth's Mantle and Core. One of its peculiar properties is channeling of a part of P-and S energy in each layer, by effectual incidence from the Mantle. This channeling, that takes place at different depth—and velocity—appears transformed in a sequence of impulses towards the Mantle and therefore towards the Earth surface.

For epicentral distances beyond 10.000 kms, these pulses precede the PP-waves and include the PPP-waves; or precede the PS-waves and include the PPS-waves.

It remains thus explained the long sequence of impulses distributed after P-waves and beyond the PPP-waves: and before PS-waves and beyond the PPS-waves. In other words, large zones of distant earthquake seismograms, so far remained without a plausible explanation, are explained in their physical signification.

1. In precedenti lavori [1-4], ho provato che tra mantello e nucleo terrestri esiste una zona di transizione — dello spessore medio massimo di 150 km circa —, e che tale zona è altresì stratificata.

Attesa l'importanza di questo fatto che, una volta preso in considerazione, non può non condurre a revisioni sulla propagazione dell'energia sismica nel nucleo, ritengo opportuno portare nuovi argomenti a riprova della validità delle precedenti conclusioni.

In precedenza, sono state esaminate onde di tipo P_cP e S_cS , seguite, ad opportuni intervalli, da onde dello stesso tipo, riflesse dalle discontinuità esistenti nella zona di transizione. Sebbene la maggior parte degli esempi scelti non consentisse dubbi sulla legittimità dell'interpretazione, taluno poteva obiettare che parte di quegli echi potesse avere un'altra provenienza, per esempio dalle discontinuità della crosta terrestre (sebbene ciò appaia escluso dagli intervalli di tempo osservati).

Allo scopo di eliminare eventuali, residui dubbi al riguardo, mi sono proposto di limitare le indagini ad intervalli delle registrazioni dove *non si potrebbero aspettare fasi di tragitti conosciuti.*

2. Si prestano particolarmente a questo fine, le registrazioni di terremoti a distanze epicentrali dell'ordine di 11.000 km, con origine nell'astenosfera.

Le onde P_a , S_a da me scoperte nel 1953, come onde longitudinali e trasversali canalizzate dall'astenosfera, a parità di altre condizioni, hanno ampiezze variabili a seconda della profondità ipocentrale, tanto maggiore quanto più l'ipocentro si trova prossimo all'asse dell'astenosfera: in questi casi infatti gran parte dell'energia viene catturata dall'astenosfera e giunge in superficie sotto forma di onde P_a , S_a , che divengono sovente le onde spa-

(*) Pervenuta all'Accademia il 24 settembre 1975.

ziali più sviluppate. In casi simili, l'energia associata alle PP, PPP, ... può essere tanto ridotta - per evidenti motivi - da non provocare registrazioni in superficie, se non sotto forma di tracce, sovente trascurabili.

Gli esempi sono numerosissimi. Mi limito qui a riportarne uno, riprodotto nella fig. 2, relativa alla componente NS del Galitzin di Uccle, dell'11 ottobre 1953, registrato a 8510 km di distanza, avendo avuto una profondità ipocentrale di 65-70 km. Si noterà la piccola ampiezza delle P e delle S e la mancanza fra le P e le P_a (notevolmente più ampie) delle PP, PPP che non vi figurano nemmeno sotto forma di tracce.

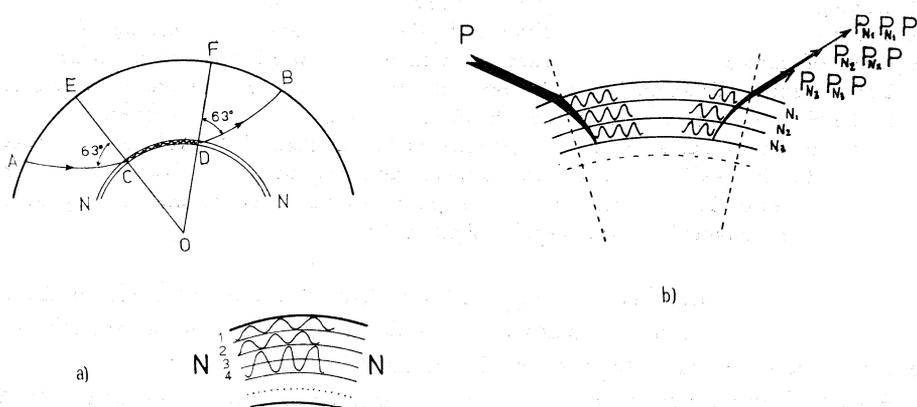


Fig. 1. - a) Schematizzazione del tragitto mantello-zona di transizione per incidenza efficace; b) Per una singola stazione le $P_{N_i} P_{N_i} P$ ($i = 1, 2, 3, \dots$) risultano dilazionate nel tempo, in ragione della penetrazione nella zona di transizione. Così, naturalmente anche per le $P_{N_i} S_{N_i} P, \dots$ (Proporzioni fortemente alterate).

Naturalmente, queste conclusioni valgono anche per distanze epicentrali 2-3.000 Km più grandi, in quanto, anche per queste distanze, le PP, PPP (specialmente le seconde) vengono catturate dall'astenosfera nella quasi totalità della loro energia, in caso di terremoti con ipocentro nel canale astenosferico. È questo il caso, per esempio, del terremoto del 10 novembre 1953, a 23.40.20, con epicentro nel punto $50^\circ, 5' N$ $157^\circ E$, alla profondità di 70 km circa ($M = 7-7 \frac{1}{4}$), che ha dato a Tamanrasset la registrazione, in parte riprodotta nella fig. 2.

Tamanrasset si trova a 11.356 km dall'epicentro. Per le ragioni su dette, nelle sue registrazioni, fra le P e le P_a non dovrebbero figurare perturbazioni apprezzabili, le PP e le PPP mancandovi completamente o comparendovi solo come tracce.

Ben diversa è la realtà: dalle 23.57.30, e per la durata di oltre due minuti e mezzo, a Tamanrasset è tutto un seguito di oscillazioni, a gruppi, e con periodi diversi (nelle quali vengono mascherate le eventuali PP, la cui registrazione dovrebbe avvenire a $58.46 \pm$). A partire da 00.01.20 (forse precedute da lievi PPP) tutta una serie di altre oscillazioni, si susseguono, con caratteristiche difformi, per oltre due minuti e mezzo, fino a confinare con le P_a ampie e sviluppate.

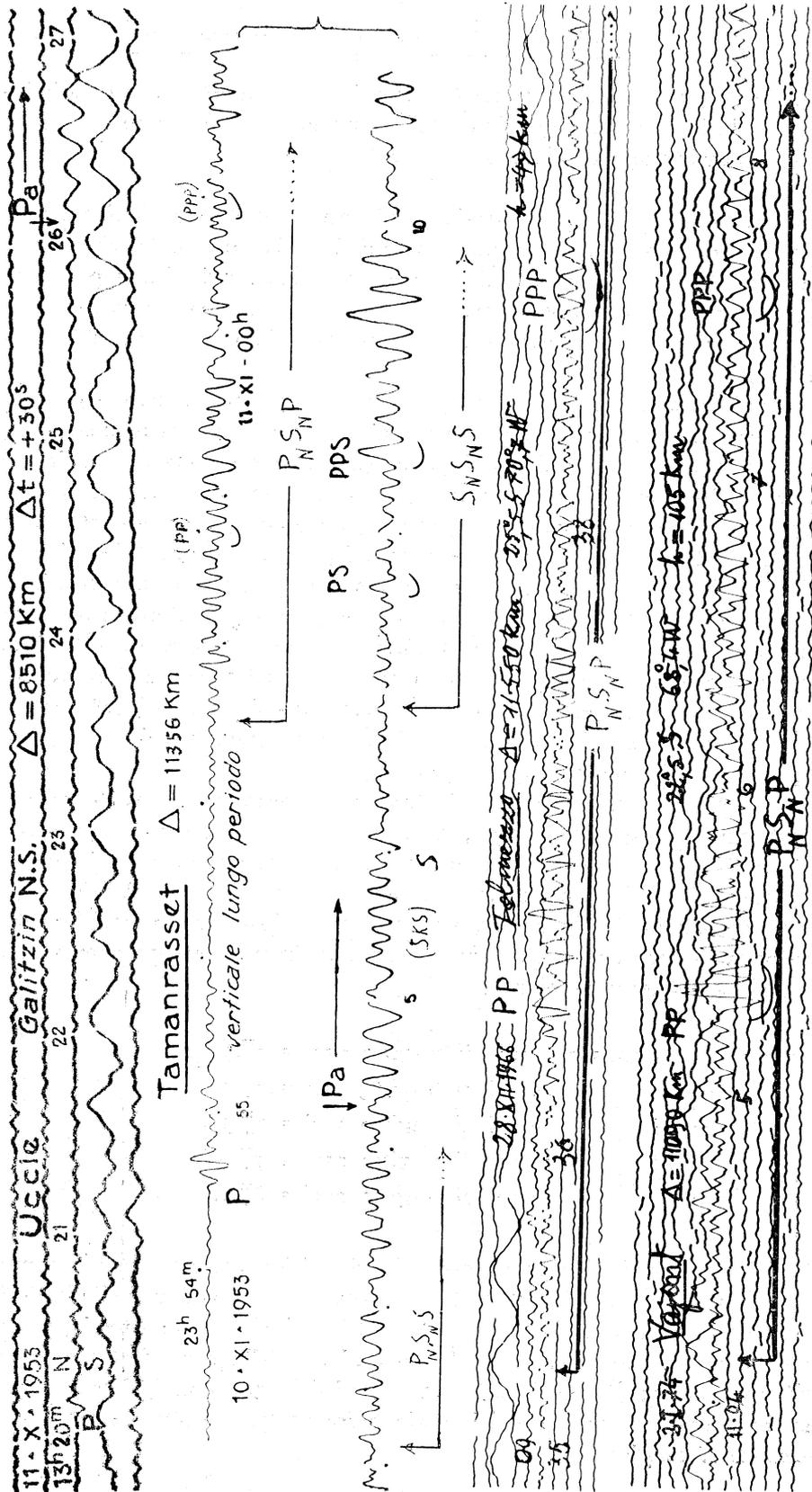


Fig. 2. - Per origine di un terremoto nell'astenosfera, fra le P e le P_a vengono a mancare (o vi figurano solo come tracce) le PP, PPP (Uccle, $\Delta = 8,510$ km). Per distanze maggiori, che consentano incidenze efficaci sul nucleo, appaiono nette le onde provenienti dalle stratificazioni della zona di transizione, con onde PP, PPP appena accennate in caso di origine in pieno canale astenosferico (Tamanrasset) o molto ampie per origine ai margini del canale stesso (Tolmezzo, Vajont).

Donde vengono tutte queste perturbazioni senza nome? Una rapida indagine per esclusione porta a concludere che esse hanno interessato, in pieno, la zona di transizione fra mantello e nucleo.

3. Attesa la distanza epicentrale (superiore ai 100°), non può trattarsi di onde P_cP e associate. D'altronde, i tempi di arrivo escludono che le fasi in questione abbiano conservato il carattere di onde longitudinali per tutto il tragitto. Un calcolo approssimativo faceva ritenere che esse percorrano la zona di transizione sotto forma di onde trasversali. Le cose stanno effettivamente in questi termini.

La teoria prova che le condizioni più favorevoli per la trasformazione delle onde longitudinali rifratte in trasversali - per caratteristiche del mezzo, ai lati dell'intersuperficie, analoghe a quelle fra mantello e zona di transizione N - si verificano per incidenze sotto angoli dell'ordine di $60-64^\circ$: per angoli d'incidenza maggiori, le onde longitudinali vengono quasi completamente riflesse. Ciò è particolarmente evidente nelle indagini di A.-Bk. Ibrahim [7, 8].

Sia l'incidenza delle P sulla zona di transizione di 63° . Per una tale incidenza, il tragitto delle P nel mantello (dirette e rifratte) copre una distanza complessiva [5] di 60° circa, a cui corrisponde un tempo di tragitto di $10^m 50^s$ ca. La distanza epicentrale di Tamanrasset essendo di $102^\circ,2$, le onde trasversali avranno da percorrere nella zona di transizione una distanza di $42^\circ,2$ circa, che, tradotta in misura lineare (tenendo conto che il raggio del nucleo è di 3470 km circa) diviene di 2555 km circa.

Nella zona di transizione, le onde trasversali verranno a distribuirsi nei vari strati che la compongono, nei quali continueranno il loro percorso prima di ritornare nel mantello come onde longitudinali (dirette nella stazione di Tamanrasset). Per calcolare i tempi approssimativi di percorrenza delle S nei vari strati della zona di transizione, possiamo valerci dei più probabili valori delle velocità in detti strati, quali furono ottenuti in una recente ricerca [4]. Vale allora la seguente tabellina:

per $v_s = 7,2$ km/sec	tempi di tragitto pari a $5^m 9$
$= 7,0$	tempi di tragitto pari a $6^m 1$
$= 6,8$	tempi di tragitto pari a $6^m 3$
$= 6,1$	tempi di tragitto pari a $7^m 0$
$= 5,0$	tempi di tragitto pari a $8^m 4$.

Poiché il tempo d'inizio (non corretto) della P è a 23.54.31, tenuto conto del tempo di tragitto della P ($13^m 50^s$) e del cammino complessivo delle $P_N S_N P$ (nel mantello e nella zona di transizione stratificata) ci si deve attendere alla stazione d'osservazione arrivi di onde provenienti dalla zona di transizione $2^m 9$; $3^m 1$; $3^m 3$; $4^m 0$; $5^m 4 \dots$ dopo le P. Cioè, sul sismogramma di Tamanrasset avremo una registrazione pressoché continua fra 23.57.26 e oltre le 24^h, *come effettivamente si verifica.*

Fra la lunga serie di oscillazioni inviate in superficie dalle stratificazioni della zona di transizione, a 23.58.46 – sotto forma di traccia – appare l'onda PP (fig. 2, Tamanrasset).

Se poi si preferisce l'incidenza delle P sotto un angolo di 60° , avremo $2t_P$ (nel mantello) pari a $10^m 44^s$; mentre l'arco AB sul nucleo sottende a $44^\circ, 2$, cui corrisponde una lunghezza di 2676 km. Con i valori di v_s prima scelti per la velocità delle onde trasversali nella zona stratificata, conseguirebbero i tempi di tragitto $3^m 6^s$, $3^m 16^s$, $3^m 28^s$, $4^m 13^s$, $5^m 29^s$ rispettivamente, e la zona del sismogramma, interessata dall'arrivo delle onde $P_N S_N P$ andrebbe da 23.57.36 fino oltre le 24^n , che differiscono pochissimo dai precedenti limiti.

Consideriamo il caso di incidenza trasversale sul nucleo. Per un'incidenza del genere, quando l'angolo è di 60° circa, si verifica il minimo di energia trasversale riflessa e il massimo di energia trasversale ritratta [6, 7]. Ad ogni incidenza di quest'ordine, corrisponde un tragitto nel mantello – diretto e rifratto – per una lunghezza superficiale di 58° circa, e un corrispondente tempo di tragitto (tenuto conto della profondità) di $19^m 40^s$ ca. Per le velocità prescelte, si hanno emergenze di $S_N S_N S$ in superficie $12^m, 1$; $12^m, 2$; $12^m, 4$; $13^m, 2$; $14^m, 4 \dots$ dopo le P. Cioè, sul sismogramma le emergenze da $S_N S_N S$ copriranno uno spazio fra 25.06.37 circa fino oltre 24.08.57; e queste ultime sono le più evidenti e nettamente le più ampie (fig. 2, Tamanrasset).

È facile constatare che le perturbazioni fra 00.02 e 00.04 possono essere attribuite a $P_N S_N S$.

In conclusione, fra le 23.57 ca. e le 24.10 ca., per la durata di circa 13 minuti, si hanno arrivi in superficie di onde provenienti dalla zona di transizione fra mantello e nucleo. Le onde dirette P ed S sono di ampiezza nettamente inferiore a quella delle oscillazioni provenienti dalla predetta zona, le quali sono superate in ampiezza soltanto dalle onde canalizzate P_a ed S_a . In questo terremoto, quindi, caratterizzato da un notevole assorbimento di energia sismica da parte del canale astenosferico (P_a , S_a) e, quindi, da onde riflesse longitudinali (PP, PPP) di piccola ampiezza, le onde $P_N S_N P$, $P_N S_N S$, $S_N S_N S$ assumono notevole rilevanza.

Naturalmente, in mancanza di canalizzazione o di ridotto assorbimento di energia sismica da parte dell'astenosfera per profondità ipocentrali poco favorevoli a questo fenomeno, diversa si presenta la distribuzione di energia per le diverse provenienze.

Consideriamo, per esempio il terremoto del Cile del 28 dicembre 1966 ($25^\circ 30' S$; $70^\circ 42' W$; $H = 08.18.07,4$; $h = 47$ km), registrato a Tolmezzo, ad una distanza di 11.550 kn circa (analoga quindi alla distanza di Tamanrasset dal terremoto prima esaminato). Un procedimento analogo a quello seguito per Tamanrasset, porta a concludere che le registrazioni ottenute in superficie nella stazione di Tolmezzo, fra le 09.35.09 e oltre le 09.38 (per le velocità prima considerate) sono da ritenere onde $P_N S_N P$, longitudinali nel mantello e trasversali nel loro tragitto nelle stratificazioni della zona di transizione, di dove escono per fenomeno di diffusione. Fra i 39^m e i $42^m, 5$ seguono le $P_N S_N S$, mentre fra le 09.44,3 e le 09.46.47 ed oltre (per velocità nelle stratificazioni

della zona di transizione da 7,0 km/sec a 5,0 km/sec...) si registrano chiare oscillazioni $S_N S_N S$, che conservano il carattere di trasversalità per tutto il percorso. In questo caso però, la limitata energia convogliata nel canale astenosferico (le P_a non figurano che come tracce), ha consentito un netto sviluppo delle onde PP, PPP, che risultano le più ampie (fig. 2, Tolmezzo).

Comportamento conforme si è avuto per lo stesso terremoto, sulla componente verticale di Pieve di Cadore, alla distanza di 11.500 km, a chiara conferma di quanto è stato detto per Tolmezzo.

Un altro terremoto di provenienza cilena ($22^{\circ},5 S; 68^{\circ},4 W; H = 10.42.29,9; h = 105$ km) e registrato al Vajont, alla distanza di 11.090 km, e a La Maina, alla distanza epicentrale di 11.130 km, ha condotto ad ancora più accentuate differenze fra fasi propagantesi nel mantello superiore (P, PP, ... PS, ...) e fasi convogliate dalla zona di transizione: in questo caso, il canale astenosferico ha trattenuto solo una frazione dell'energia sviluppata dal terremoto, che ha così avuto modo di alimentare le fasi ordinarie e le fasi provenienti dalla zona di transizione ($P_N S_N P, \dots S_N S_N S$) e dal nucleo (SKS, SKKS, ...).

I calcoli condotti con i dati di incidenza e i velocità prescelti per i casi esaminati ($i_e = 60^{\circ}, 2 \vartheta_p = 57^{\circ}; 2 t_p = 10^m 22^s; v_s$ da 7,2 a 5 km/sec), hanno portato alle conclusioni riassunte sul sismogramma verticale, per quanto concerne il Vajont (fig. 2), avendo ottenuto un comparabile risultato per la stazione di La Maina. In entrambe le stazioni, ampie onde, di normale interpretazione, provenienti dal mantello e dal nucleo, si trovano frammiste fra lunghe serie di onde, frequentemente di pari ampiezza, convogliate dalla zona di transizione fra mantello e nucleo.

4. Resta così provato che, per distanze intorno agli 11.000 km (ed oltre), si verifica una notevole cattura di energia sismica da parte della zona stratificata di transizione fra mantello e nucleo; energia sismica che viene convogliata dagli strati componenti la zona stessa e restituita verso la superficie della Terra, per fenomeno analogo a quello che anima le P_a, S_a . Le incidenze più efficaci - sia longitudinali che trasversali - alla base del mantello sono dell'ordine di $60^{\circ}-63^{\circ}$: tali incidenze infatti presentano le condizioni più favorevoli per la rifrazione nella zona di transizione sia delle onde longitudinali (con la contemporanea loro trasformazione in trasversali), sia delle onde trasversali. Per le distanze epicentrali sopra dette, le onde trasversali percorrono nella zona di transizione distanze dell'ordine di 2400-2600 km, prima di ritornare nel mantello. Poiché la velocità delle onde sismiche, longitudinali e trasversali, diminuisce da uno strato al sottostante della zona di transizione (le trasversali, per esempio, passano da 7,2 a 7,0; 6,8; 6,1; 5,0... km/sec), giungono in superficie lunghi treni d'onde, che si distribuiscono in tre-quattro minuti di registrazione, nel relativo sismogramma, sia nel caso di onde $P_N S_N P$ o di $S_N S_N S$ (o di onde miste, tipo $P_N S_N S$).

Lunghe serie di onde $P_N S_N P, \dots S_N S_N S$ quasi pure, si hanno quando l'ipocentro si manifesta nel canale astenosferico, ad una profondità tale da consentire l'assorbimento, da parte dell'astenosfera, di una forte percentuale

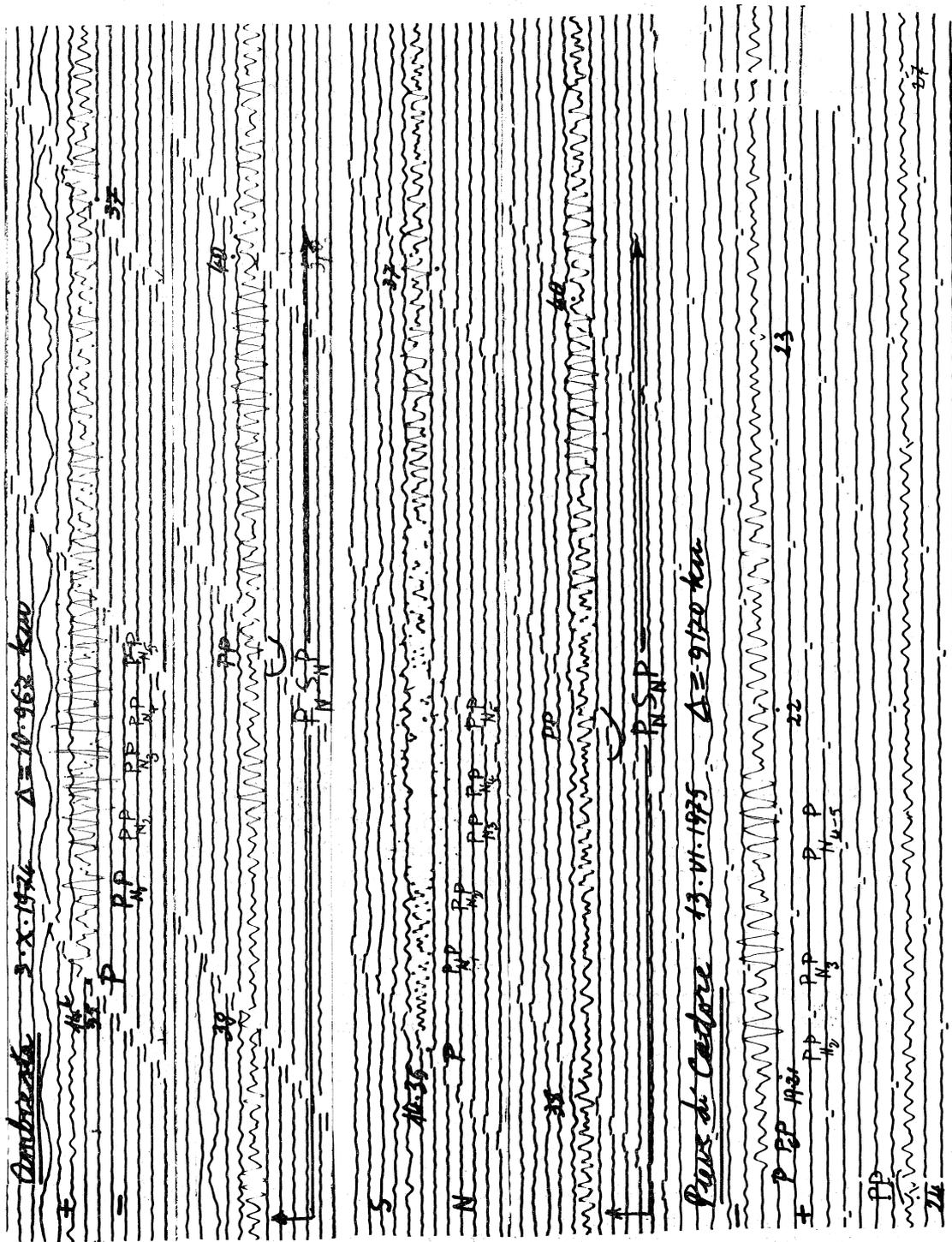


Fig. 3. - Per distanze intorno ai 9,000 km, riescono particolarmente evidenti gli echi dalle discontinuità della zona di transizione (Pieve di Cadore); per distanze maggiori (Ambiate), nette risultano pure le onde canalizzate nella zona di transizione.

di energia sismica (rivelato dall'assenza delle onde PP, PPP); in altri casi, le onde PP, PPP, ... PS, PPS, ... emergono fra i treni d'onde provenienti dalla zona di transizione.

Ricordiamo, a questo punto, che per incidenze oltre gli 80° , il coefficiente di riflessione diviene elevatissimo: il che equivale a dire che fra gli 8.500 e i 9.600 km, ampie tornano in superficie le P_eP e associate $P_{N_1}P$, $P_{N_2}P$, ... e le S_eS ed associate $S_{N_1}S$, $S_{N_2}S$, ... Un chiaro esempio si ha nella fig. 3 (Pieve di Cadore).

Ma non è tutto. Per distanze fra i 9.600 e gli 11.000 - non precisabile a causa della non sfericità del nucleo - le onde P tangono, e, in parte, penetrano la zona di transizione, dando origine al fenomeno di resa delle onde P_eP , ed associate $P_{N_1}P$, $P_{N_2}P$, ... (e analogamente per le S). Contemporaneamente, le onde P ed S, che incidono sotto angoli di $60^\circ - 63^\circ$, producono le onde $P_N S_N P$, ... $S_N S_N S$. Sicché, per tali distanze, *sullo stesso sismogramma*, dovranno figurare le onde convogliate dalle stratificazioni stesse. Una chiara testimonianza di questi fatti è stata fornita dal terremoto del Perù del 3 ottobre 1974 ($12^\circ, 1 S$; $77^\circ, 1 W$; $h = N$, $H = 14.21.32,4$; $M = 7,3$), nelle registrazioni ottenute a Pieve di Cadore, Vajont, La Maina, Ambiesta, ... Mi limiterò a riportare due tratti iniziali delle componenti verticale e NS della stazione sismica dell'Ambiesta (presso Tolmezzo, fig. 3), dove appaiono chiarissime le registrazioni associate alle P_eP ($P_{N_1}P$, $P_{N_2}P$, ...) da pochi secondi dopo l'inizio, per la durata di circa un minuto e mezzo; seguite, a partire dalle 14.37.35 ca. e fino oltre le 14.40 [per incidenza di 63° , $AE + EF = 60^\circ$, 3; $AB = 98^\circ$, 7 (10.967 km); $AC + DB = 10^m 52^s$; $CD = 2325$ km, e velocità delle S della zona di transizione, variabilità fra 7,2 e 5,0 km/sec...] da onde $P_N S_N P$. Si noterà che gli strati più attivi, sia per la restituzione che per la canalizzazione, sono i più interni della zona di transizione e, quindi, più prossimi al nucleo.

Va ancora aggiunto che nella fig. 3 (Ambiesta), le oscillazioni, che mutano bruscamente ampiezza e forma, a partire dalle 14.36 e per la durata di un minuto e mezzo circa (su entrambe le componenti), vanno considerate come onde P rifratte e canalizzate nella zona di transizione ($P_N P_N P$). Osservazione analoga per la fig. 3 (Pieve di Cadore) per quanto si riferisce al tratto successivo al 22.mo minuto.

Ciò ci consente di concludere che, unendo ai risultati di altre ricerche quelli raggiunti nel presente lavoro, *si viene a dar ragione dell'esistenza di lunghe sequenze di oscillazioni, rimaste fino ad oggi senza una plausibile spiegazione*, e a portare un notevole chiarimento in larghe zone di un sismogramma di terremoto fra gli 8.500 e i 13.000 km ca.

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., ser. 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] P. CALOI e P. F. BIAGI (1974) – *Sulla stratificazione della zona di transizione fra mantello e nucleo*, « Rend. Acc. Naz. dei Lincei », Cl. Sc. fis., mat. e nat., ser. VIII, 56 (5).
- [5] B. GUTENBERG e C. F. RICHTER (1939) – *On seismic Waves* (Fourth paper), « Gerlands Beiträge zur Geophysik », 54, 94–136.
- [6] B. GUTENBERG (1944) – *Energy Ratio of Reflected and Refracted Seismic Waves*, « Bull. Seism. Soc. Am. », 34 (2).
- [7] ABOU-BAKR K. IBRAHIM (1971) – *Effects of a Rigid Core on the Reflection and Transmission Coefficients from a Multi-Layered Core-Mantle Boundary*, « Pageoph », 91, 95–113.
- [8] ABOU-BAKR K. IBRAHIM (1971) – *The Amplitude Ratio P_cP/P and the Core-Mantle Boundary*, « Pageoph », 91, 114–133.