
ATTI ACCADEMIA NAZIONALE DEI LINCEI
CLASSE SCIENZE FISICHE MATEMATICHE NATURALI

RENDICONTI

PIETRO CALOI

Sulle reali dimensioni del nucleo terrestre

*Atti della Accademia Nazionale dei Lincei. Classe di Scienze Fisiche,
Matematiche e Naturali. Rendiconti, Serie 8, Vol. 36 (1964), n.6, p. 741–746.*
Accademia Nazionale dei Lincei

<http://www.bdim.eu/item?id=RLINA_1964_8_36_6_741_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 10 giugno 1964

Presiede il Socio anziano MAURO PICONE

NOTE DI SOCI

Geofisica. — *Sulle reali dimensioni del nucleo terrestre.* Nota (*)
del Socio PIETRO CALOI.

1. Era opinione universalmente accettata che il mantello terrestre cessasse pressoché bruscamente alla profondità di 2900 Km circa, per dar luogo al nucleo, nella sua parte fluida esterna. Le difficoltà circa la formazione e la delimitazione della zona d'ombra erano trasferite nelle difficoltà di precisare il meccanismo di propagazione dell'energia sismica intorno al nucleo, ammettendo ormai come assiomatico l'inizio di quest'ultimo a quota 2900. A più riprese, Jeffreys e la Lehmann — negli ultimi tempi, specialmente quest'ultima — tornarono sulla questione della zona d'ombra associata al nucleo e sulle perplessità persistenti nello spiegare la propagazione delle P nella zona d'ombra per fenomeno di diffrazione [1]. A questo riguardo, i dubbi della Signorina Lehmann confinarono, recentemente, con la convinzione dell'esistenza di accidentalità alla base del mantello, alle quali andrebbero, in qualche modo, collegate le cennate difficoltà [2].

Dopo la scoperta del nucleo e l'accettazione delle sue dimensioni, quali furono indicate dalle ricerche di Gutenberg e di Jeffreys, una delle cose controverse fu la precisazione dell'andamento della velocità delle onde longitudinali e trasversali alla base del mantello. In precedenza, Dahm — per il quale il nucleo aveva inizio intorno a 3.100 Km di profondità — aveva con-

(*) Presentata nella seduta del 10 giugno 1964.

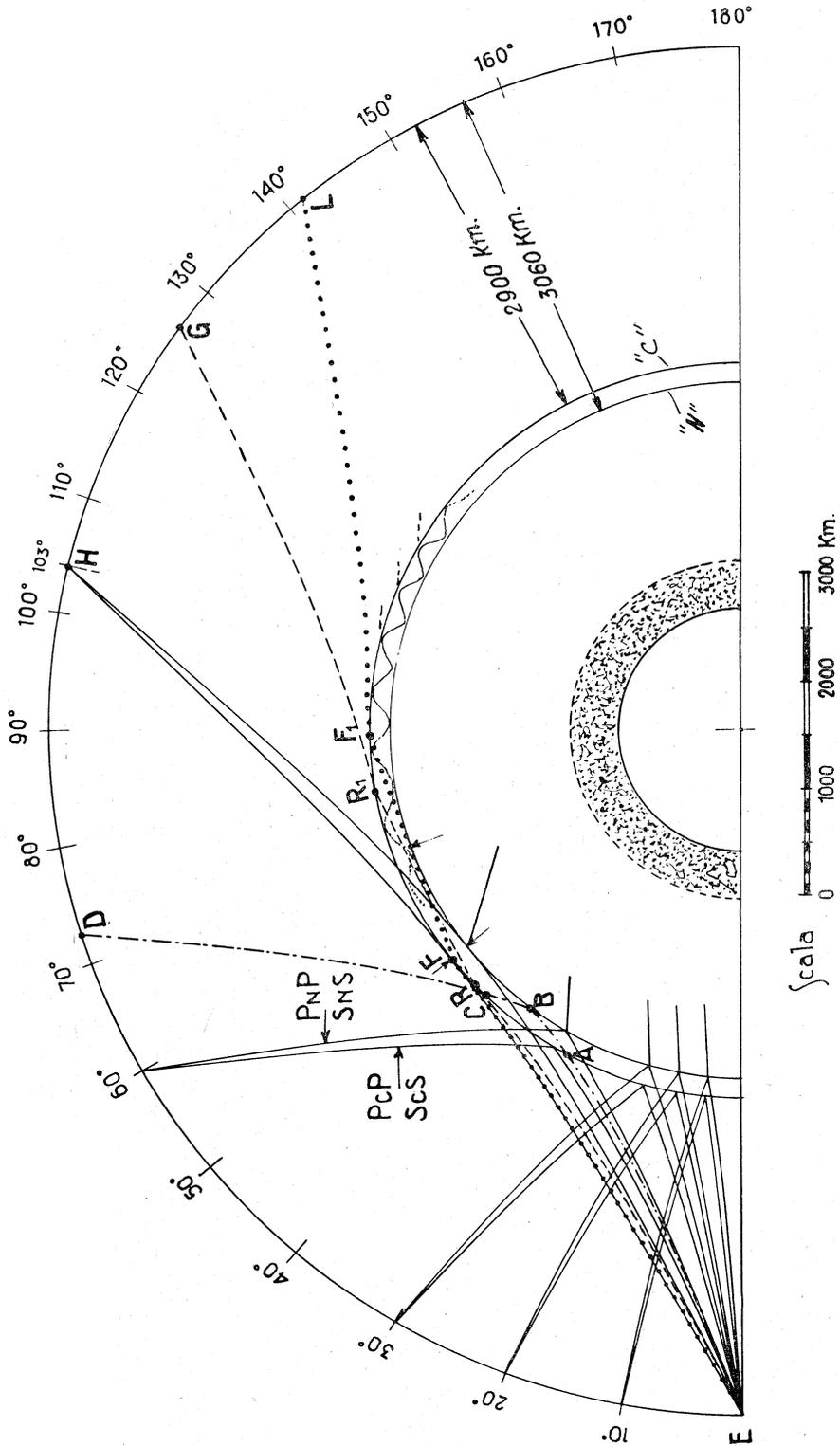


Fig. 1. - EA + AB + BC + CD (con AB e BC rettilinei) tragitto generico di un'onda $P_N P$ (o $S_N S$). Naturalmente esistono anche tragitti misti ($S_N P$ oppure $P_N S$) corrispondenti alle $S_C P$ o $P_C S$.

I tragitti ER + RR₁ + R₁G hanno il tratto RR₁ come dovuto a semplice rifrazione nello strato-base del mantello; essi possono emergere in superficie anche prima del raggio limite inferiore EFH della zona d'ombra. Nella zona d'ombra possono pure emergere delle onde guidate dallo strato-base.

cluso ammettendo l'esistenza di una regione, a base del mantello, caratterizzata da velocità costante. Successivamente Gutenberg – e Jeffreys – precisando in 2920 – e 2898 rispettivamente – la profondità della superficie di Wiechert, indicarono una lievissima flessione della velocità alla base del mantello; flessione ritenuta da Jeffreys non valutabile con il metodo di Wiechert–Herglotz, tanto che la profondità del nucleo fu da lui calcolata facendo uso dei tempi delle onde ScS. Lo scrivente, nel 1962, allo scopo di precisare la velocità delle onde sismiche alla base del mantello, propose un semplice metodo, la cui applicazione portò a confermare la reale esistenza di una flessione nella velocità delle onde sismiche nella zona D'', alquanto più accentuata, invero, di quanto si era portati a credere [3].

Va precisato, a questo punto, che le sopra dette indagini furono eseguite nella tacita presunzione che il mantello (parte solida esterna della Terra) cessasse alla profondità di 2900 Km, per dar luogo al nucleo centrale. I primi dubbi, a questo riguardo, sorsero nello scrivente durante lo studio delle onde PKiKP [4]. Le onde ScS, PcS registrate a Tolmezzo presentavano infatti una persistenza eccessiva, se dovevano essere attribuite alla riflessione di una singola superficie di discontinuità. Una revisione dell'interpretazione fatta nel 1961, mi portò alla convinzione che i gruppi PcP, PcS, ScS vengono meglio spiegati ammettendo l'azione riflettente di *due* superficie di discontinuità: la prima, *quella a cui si devono gli echi più cospicui*, a quota 2900 (per l'addietro considerata base del mantello), la seconda 160 Km circa più sotto. In tal modo lo spessore del mantello risulterebbe di 3060 Km circa, e il raggio del nucleo sarebbe ridotto in proporzione (fig. 1).

2. Se le cose stavano in questi termini, si sarebbe dovuto riscontrare i massimi intervalli di registrazione fra le onde riflesse a 2900 Km (indicate con l'indice *c*) e quelle riflesse a 3060 Km (che contrassegnerò con l'indice N, iniziale di « nucleo ») per le distanze epicentrali di valore minimo. Ciò è stato effettivamente constatato. I terremoti di provenienza dalle isole del Mar Egeo (che sono fra i più vicini forti terremoti, registrati a Tolmezzo negli ultimi anni) hanno di fatto fornito i massimi intervalli di registrazione fra ScS—S_NS, P_CS—P_NS, P_CP—P_NP (Tav. I). Cito sovente la stazione sismica di Tolmezzo, perché – come ho spiegato in un precedente lavoro [5] – la sua particolare situazione consente, agli apparecchi a breve periodo, un'inusitata locale naturale amplificazione delle oscillazioni con periodi fino a 2^s ca. (l'« Untergrundfaktor » di Gutenberg), periodi associati appunto alle onde rimandate dallo strato base del mantello. Tali onde però furono constatate anche per distanze maggiori e – come doveva avvenire – l'intervallo di registrazione fra le onde rimandate dalla discontinuità « *c* » e quelle riflesse dalla discontinuità « N » va gradatamente diminuendo; non solo, ma, a parità di altre condizioni, esso riesce massimo fra le S_CS e S_NS e minimo – per ovvie ragioni – fra le P_CP e le P_NP. (Vedi Tav. III, IV e V).

Va inoltre messo nel dovuto risalto il fatto che le onde S_CS—S_NS sono essenzialmente onde trasversali tangenziali (onde SH) e pertanto la loro

presenza è particolarmente marcata sulle componenti più discoste dalla direzione di provenienza. Al contrario, le onde $P_C P - P_N P$, $P_C S - P_N S$ sono particolarmente evidenti sulle componenti più prossime a quelle di provenienze. Ecco perché nelle registrazioni provocate da terremoti delle isole egee spiccano a Tolmezzo le $S_C S - S_N S$, mentre, nella stessa stazione, risultano esaltate le $P_C P - P_N P$, $P_C S - P_N S$ per terremoti provenienti da direzione prossima all'E (a Tolmezzo funziona attualmente la sola componente EW), come quelli dell'Hindu-Kush (Tav. II).

Non potevo, naturalmente, accontentarmi di registrazioni ottenute presso una sola stazione sismica e, nemmeno, di gruppi d'onde che potessero ammettere qualche altra spiegazione. Mi sono pertanto preoccupato di trovare testimonianze anche fra i sismogrammi di altre stazioni sismiche, e per terremoti che non consentissero alternative di interpretazione.

Non mi dilungherò in una esemplificazione superflua. Mi basterà citare gli esempi inconfondibili ottenuti a Tucson (Arizona) e a Cleveland in occasione del terremoto profondo del 15 agosto 1950 (Tav. III, *a*) e *b*). Anche da queste registrazioni appare netta la prevalenza delle onde tipo SH nelle $S_C S - S_N S$. Come pure *risulta evidente la notevole estinzione che tali onde subiscono da parte dello strato base del mantello.*

3. L'esistenza di questo strato consente il superamento di ogni seria difficoltà concernente la propagazione delle onde sismiche nella zona d'ombra.

La prima grossa difficoltà consisteva nella precisa delimitazione della zona d'ombra, nella sua posizione iniziale, che - nel caso di brusca cessazione del mantello a 2900 Km di profondità - sarebbe dovuta apparire piuttosto netta, la propagazione delle onde longitudinali (e trasversali) oltre i 103° circa (posizione di tangenza) essendo affidata al solo fenomeno di diffrazione intorno al nucleo. In effetti un tale limite, diligentemente perseguito da diversi studiosi (e, in modo particolare, dalla Signorina Lehmann), non è stato in realtà mai chiaramente osservato.

E non poteva esserlo, in quanto - stando le cose come da me sopra esposte - le onde P dirette vengono *gradualmente* sostituite e prolungate dalle onde P *rifratte* in corrispondenza dello strato base del mantello. La diminuzione d'ampiezza delle onde longitudinali (e trasversali) in corrispondenza dell'inizio della zona d'ombra, non si presenterà quindi *brusca*, ma solo *lenta* e *graduale*. Come di fatto si osserva.

Di solito - specie nella registrazione dei sismografi a breve periodo - la fase iniziale delle onde dirette longitudinali (e trasversali) è seguita, già per distanze epicentrali oltre gli 8.000 Km, da persistenti gruppi di onde a breve periodo, non classificabili come onde $P_C P$ (e $S_C S$). L'esistenza di uno strato di transizione spiega chiaramente la presenza di questi treni d'onda (per l'addietro ritenuta alquanto misteriosa), dovuti a rifrazione di onde longitudinali (o trasversali) nello strato stesso *prima del pericentro* dell'onda, e leggermente ritardati nella loro registrazione dal lieve rallentamento subito nello strato base, dove la velocità di propagazione delle onde longitudinali e

trasversali subisce, come si è detto e verrà precisato più oltre, una sensibile flessione.

Un altro fatto inspiegabile con i precedenti modelli sulla costituzione del basso mantello (*lower mantle*) è l'esistenza, sui sismogrammi di sismografi a medio periodo proprio, di ampie onde a periodo relativamente lungo (si vedano i chiari esempi riportati nel citato lavoro di I. Lehmann [1]) in piena zona d'ombra. Tali onde possono chiaramente essere identificate come onde guidate dallo strato di transizione, raggiungenti la superficie terrestre con un meccanismo analogo a quello associato alle onde Pa, Sa guidate dall'astenosfera. Lo strato in questione, oltre alla presenza delle onde a breve periodo, attribuibili a semplice rifrazione, dà quindi ragione anche delle onde con periodo dell'ordine di 10^s — 15^s seguenti le P nella zona d'ombra.

Un altro fatto rimaneva inspiegabile nella precedente ricostruzione del mantello inferiore. Ripetutamente Jeffreys ottenne, per la curva dei tempi di tragitto per le onde P al di là dei 105° , *una retta con pendenza maggiore di quella delle onde dirette*. Alla stessa conclusione giunse I. Lehmann. In generale, quindi, dai ricercatori fu trovato che le onde P « difratte » per distanze epicentrali maggiori di 103° arrivano in tempi maggiori di quelli calcolati sulla base di curve di tragitto estrapolate dalla curva di tragitto (retta) delle onde P dirette, a partire dalla distanza epicentrale di 103° , ritenuta da Gutenberg come punto d'inizio della zona d'ombra.

L'esistenza di uno strato solido al di sotto della discontinuità « c » spiega chiaramente il ritardo accennato: da 103° in poi, infatti, le onde registrate sono effettive onde *rifratte* in un mezzo caratterizzato da velocità di propagazione per le onde sismiche, lievemente inferiori a quelle proprie del mezzo sovrastante: *di qui il ritardo delle onde longitudinali nella zona d'ombra nei confronti delle onde P dirette*.

4. A questo proposito, ho già provato, in un lavoro precedente [3], che le onde P registrate nella zona d'ombra si propagano effettivamente con velocità inferiori a quelle delle onde P dirette nello strato confinante con la discontinuità « c ». Quei valori, alla luce delle nuove acquisizioni, risultano veri per *eccesso*. Infatti, se il raggio del nucleo viene diminuito da 3450 Km a 3300 Km, la velocità *media reale* nello strato fra 2900 e 3060 Km circa diviene di 12,9 Km/sec, alquanto inferiore quindi ai valori di 13,7—13,6 Km/sec che tale velocità raggiunge al di sopra della discontinuità « c » (cioè immediatamente al di sopra di 2900 Km).

In conclusione, anche le testimonianze indirette confermano l'esistenza di uno strato di transizione fra 2900 e 3060 Km circa, alla quale ultima profondità ha inizio l'effettivo nucleo esterno.

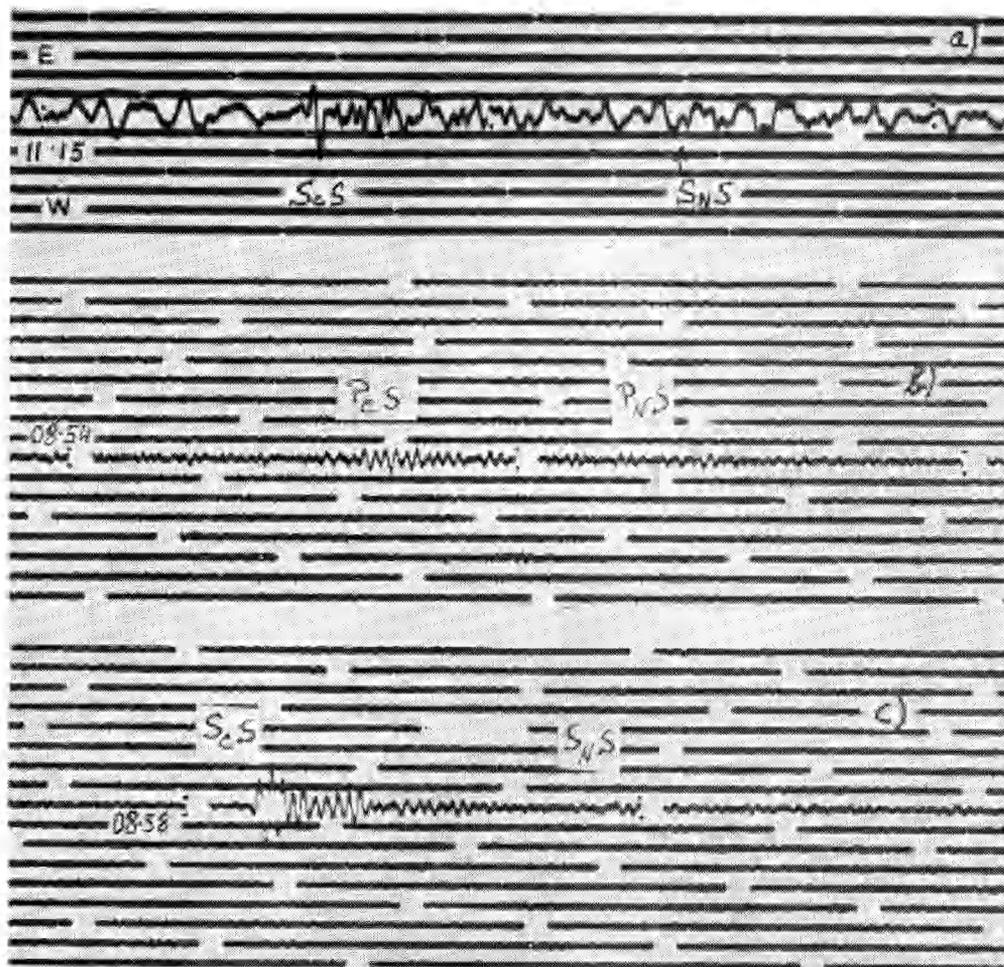
5. Ci si può chiedere in che modo si è potuto formare, alla base del mantello terrestre, uno strato elasticamente tanto diverso dalla parte superiore a contatto, da esserne separato — sempre dal punto di vista elastico — da una discontinuità così netta, come quella esistente a circa 2900 Km di

profondità, capace di riflettere cospicua parte dell'energia sismica, come quella associata alle onde $P_C P$, $P_C S$ e, specialmente, $S_C S$. Direi che è da escludere un fenomeno di differenziazione gravitativa, al quale - caso mai - sarebbe da ascrivere, in condizioni normali, un effetto opposto, almeno per ciò che si riferisce alle velocità di propagazione. D'altronde, la constatata diminuzione di velocità ben difficilmente potrebbe ascrivere a situazioni analoghe a quelle esistenti nell'astenosfera, dove la flessione di velocità è quasi certamente da attribuire all'esistenza di un mezzo peridotitico in composizione bifase.

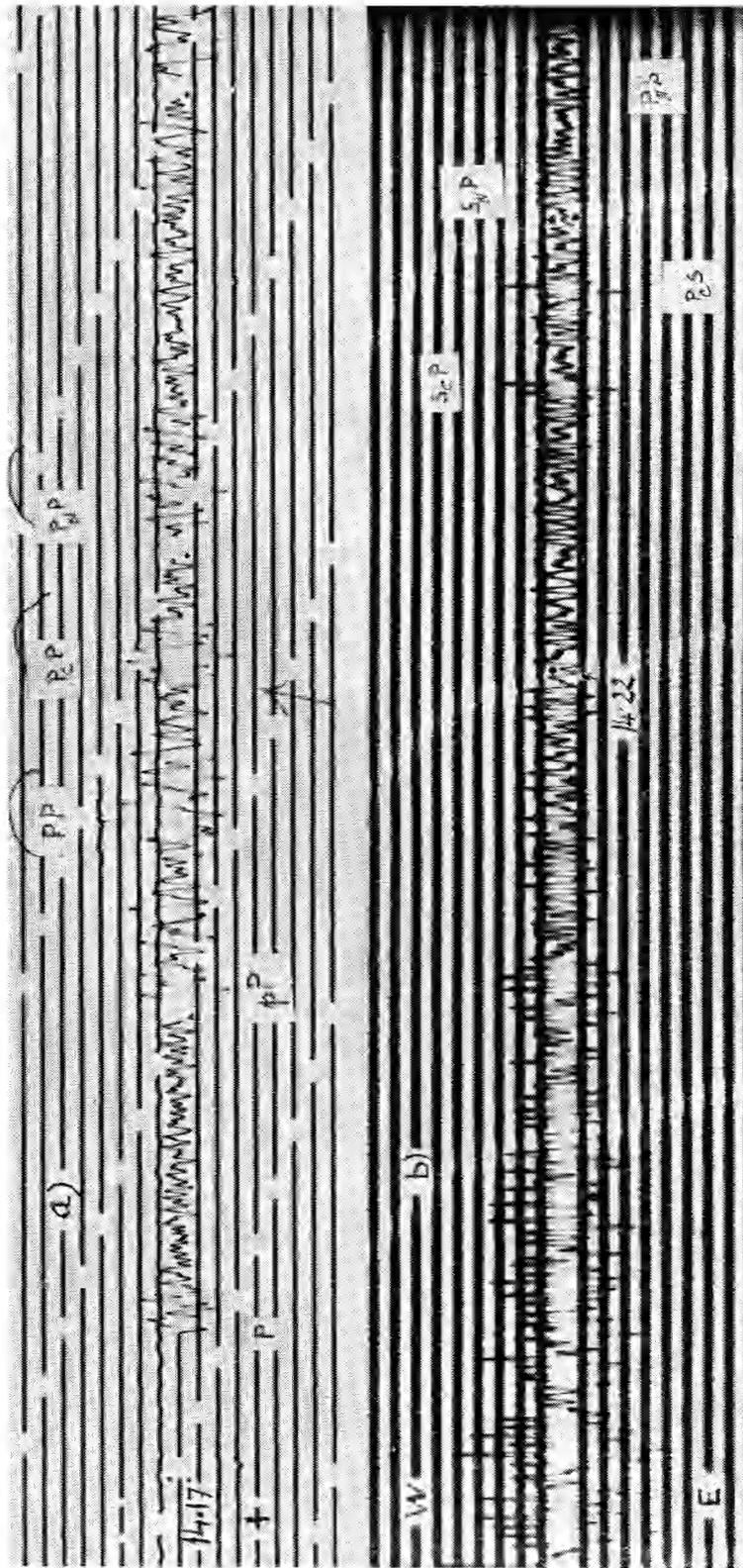
Qui sembra più consono invocare l'intervento di condizioni limiti di pressione (e di temperatura), atte a consentire una diminuzione del fattore elastico, in favore di quello concernente la densità. In altri termini, a 2900 Km di profondità, conformemente alla teoria di Ramsey, deve iniziare la transizione per pressione dalla fase molecolare ad una fase metallica della materia, con conseguente, graduale prevalere della densità sull'elasticità ai fini della velocità di propagazione. A 3060 Km di profondità si verificherebbe il collasso dell'edificio molecolare.

BIBLIOGRAFIA.

- [1] I. LEHMANN, *On the shadow zone of the earth's core*, « Bull. Seism. Soc. Am. », vol. 43, n. 4, p. 291 (1953).
- [2] I. LEHMANN, *On amplitudes of P near the shadow zone*, « Ann. Geofis. », XI (1958).
- [3] 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).
- [4] P. CALOI, *Sulla natura fisica del nucleo interno della Terra*, « Rend. Acc. Naz. dei Lincei » (Classe Sc. fis., mat. e nat.), ser. VIII, vol. XXXIV, fasc. 4 (1963).
- [5] P. CALOI, *Seismic Waves from the Outer and the Inner Core*, « Geophys. Journ. of the Roy. Astr. Soc. », vol. 4 (1961).

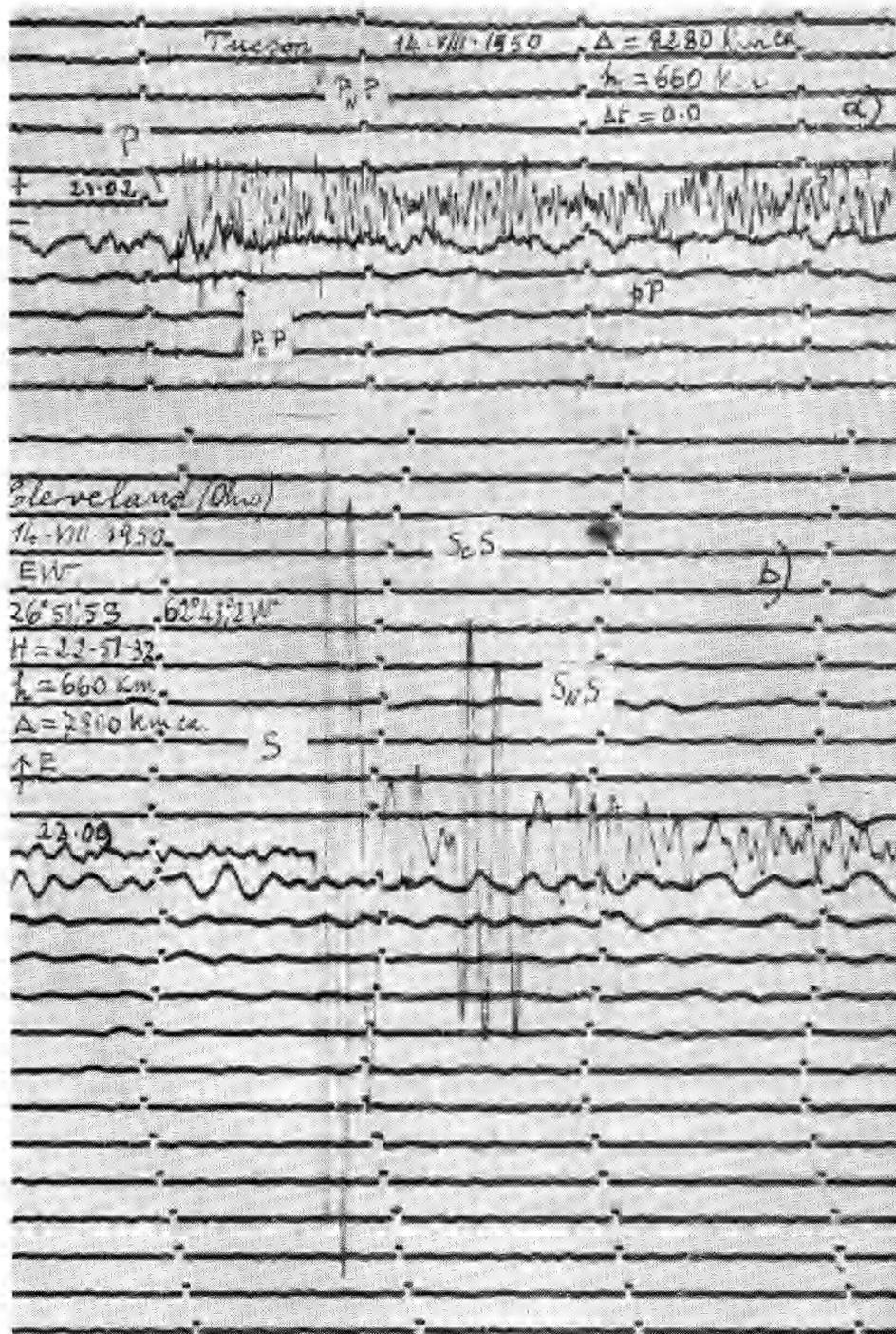


a) 28 agosto 1962 ($38^{\circ}0'N$; $23^{\circ}1'E$; $h = 120$ km) (a): $S_e S$, $S_N S$ registrate a Pieve di Cadore ($\Delta = 1420$ km); b) 30 giugno 1958 (Sporadi meridionali): $P_e S$, $P_N S$ registrate a Tolmezzo (EW, $\Delta = 1630$ km); c) 30 giugno 1958 (Sporadi meridionali): $S_e S$, $S_N S$ registrate a Tolmezzo (EW, $\Delta = 1630$ km).

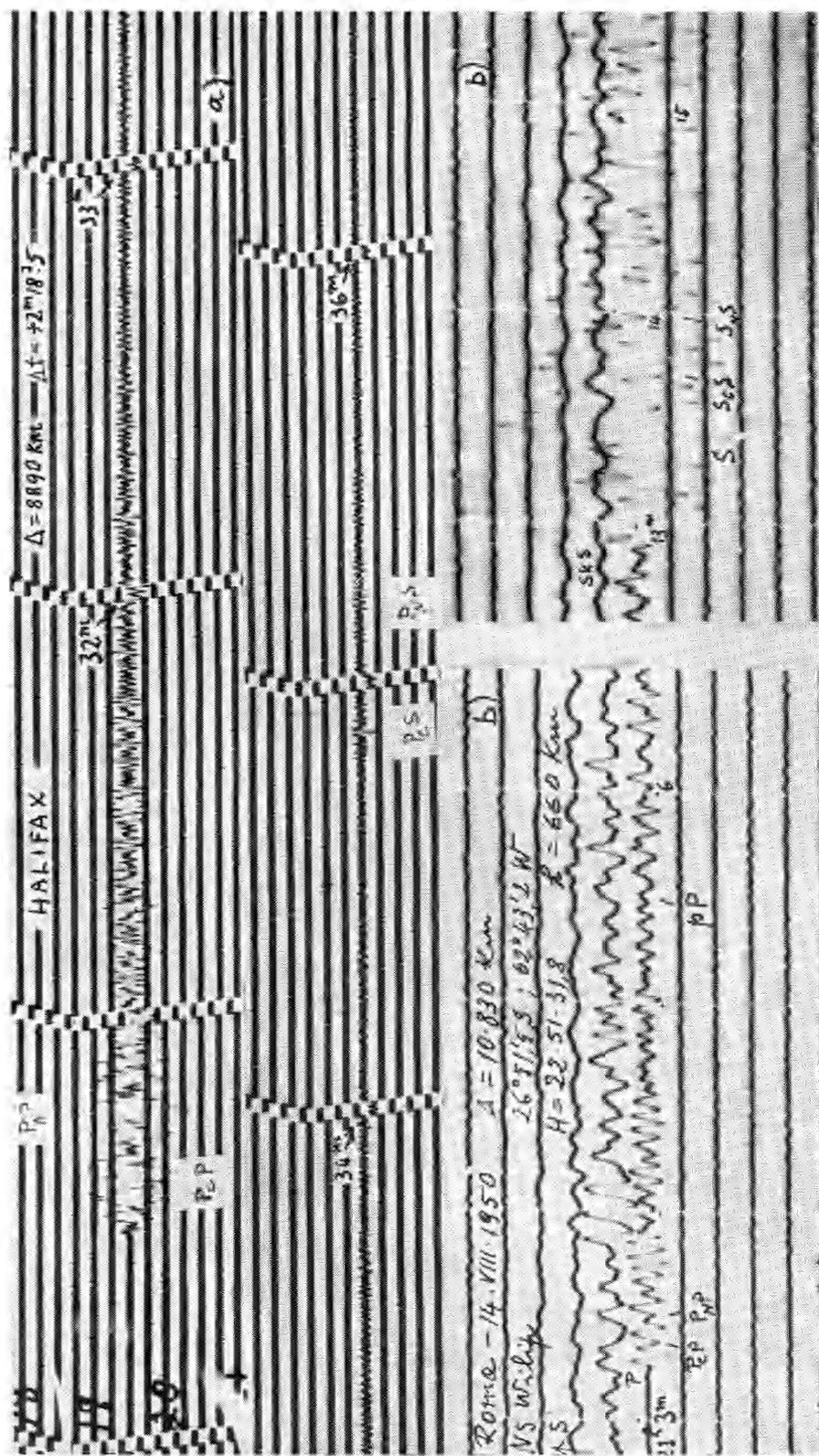


28 gennaio 1964 (36° 5' N; 70° 9' E Hindu Kush) $H = 14.09, 17, 1;$ $h = 207$ km) $P_c P, P_N P, S_c P, P_c S, S_N P, P_N S$ registrate a Tolmezzo ($\Delta = 4900$ Km ca.)

a) comp. vert.; b) comp. E-W.



a) L'ampiezza delle $P_N P$ è sempre accentuata, anche nei confronti delle $P_N P$; b) Le $S_N S$, (trasversali tangenziali), sono fortemente assorbite dallo strato-base del mantello terrestre.



Le P, P₁, P₂, P₃, P₄, P₅, S e le onde che comunque interessano, come onde rifratte, la base del mantello, sotto essenzialmente a breve periodo. In a), la comp. vert. Willmore a breve periodo filtrata, misura del terremoto dell'Iran (P^o sismologia torca), la sola onda a breve periodo (≤ 1^o); tanto che la registrazione si finiva ai primi 6 m soltanto; tali onde sono esclusivamente onde futurissimi in strato base del mantello (riflesse o, genericamente, rifratte). Per onde dirette: P ed S, pressione alla distanza 1000 r / a (come in b)) in cui l'arco completo dei raggi diretti è di circa 100°, S₁ per a circa 1000 km), le onde: P₁, P₂, P₃, P₄, P₅ sono d'ampiezza pressoché uguale così come le S₁, S₂, S₃, S₄, S₅. Dopo le due e le altre, vengono onde che hanno percorso, come onde rifratte, la stessa base del mantello.