
ATTI ACCADEMIA NAZIONALE DEI LINCEI
CLASSE SCIENZE FISICHE MATEMATICHE NATURALI
RENDICONTI

PIETRO CALOI

**Sull'esistenza di canali-guida di onde trasversali nel
mantello superiore**

*Atti della Accademia Nazionale dei Lincei. Classe di Scienze Fisiche,
Matematiche e Naturali. Rendiconti, Serie 8, Vol. 62 (1977), n.4, p. 529–538.*

Accademia Nazionale dei Lincei

<http://www.bdim.eu/item?id=RLINA_1977_8_62_4_529_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. — *Sull'esistenza di canali-guida di onde trasversali nel mantello superiore.* Nota (*) del Socio PIETRO CALOI.

SUMMARY. — It was common opinion, till ten years ago, that in mantle should exist an only guide channel of seismic energy: the asthenosphere. The study of deep focus earthquakes (beyond the 600 kms) made supposing the existence of surfaces (or layers) able to guide some shear seismic energy, associated with waves of channel wave type. Several large trains of waves, after the SS-waves, awaited a physical explanation.

Ibrahim and Nuttli (1967) and Anderson and Jordan (1969, 1973) proved the existence of low velocity S-waves layers about 400 kms and, especially, about 650 kms deep. In this work one demonstrates that the above mentioned trains of waves are channel waves guided by the low velocity S-waves layers. The weakness of the overhanging layers permits to the seismic energy to reach the earth surface, as surface waves.

1. Il primo canale-guida di energia sismica nell'interno della Terra, fu scoperto nel 1953[4]: esso è compreso nell'astenosfera e trova la sua spiegazione fisica nella zona a flessione di velocità, ivi esistente.

Le conoscenze, fino allora acquisite, sull'andamento della velocità delle onde longitudinali e trasversali nel mantello terrestre, venivano ad escludere la possibilità dell'esistenza di altri canali fino alla base del mantello inferiore. L'avvento dei calcolatori elettronici, rese più frequenti queste indagini sulle velocità; però, almeno fino al 1967, i risultati ottenuti ribadirono l'inesistenza di altre zone a flessione di velocità.

L'interpretazione dei sismogrammi di terremoti profondi, mi hanno però sempre lasciato perplesso: specialmente dopo le SS, esistevano ampie fasi senza plausibile interpretazione. In un lavoro del 1960, trovai che una di dette fasi si poteva identificare con onde S_a , penetrate dal basso nell'astenosfera, con inclinazione atta alla cattura da parte del canale astenosferico. Restavano però inesplicabili altri ampi gruppi di oscillazioni fra le SS e le S_a . Poiché in quell'epoca era stata precisata l'esistenza della discontinuità 20° alla profondità di 530 km ca [6], spiegai queste fasi come onde di Stoneley, guidate da detta discontinuità. L'interpretazione non era però del tutto soddisfacente, sopra tutto a motivo del periodo di tali onde che — secondo la teoria di Stoneley — doveva essere nettamente superiore a quello osservato [6].

2. Il terremoto del Mar del Giappone dell'8 ottobre 1960, verificatosi alla profondità di 608 km, con epicentro nel punto $40^\circ,0\text{ N}$; $129^\circ,7\text{ E}$, fu oggetto di varie ricerche da parte dell'Autore. Studiando questo terremoto, mi fu dato di precisare sperimentalmente l'esistenza della discontinuità 20° alla profondità di 520 km ca., nonché di ottenere chiare registrazioni di onde

(*) Presentata nella seduta del 16 aprile 1977.

riflesse dalle discontinuità presenti nella zona di transizione tra mantello e nucleo. Fu durante questi studi che mi accorsi dell'esistenza di una fase - non ancora precisata - che, provvisoriamente, indicai con il simbolo S_{ms} (m = mantello; s = superiore) [5], di cui al n. 1.

Avendo a disposizione le registrazioni ottenute in una trentina di Osservatori, sparsi per il mondo - dopo aver constatato che detta fase presentava una velocità apparente costante -, applicato il metodo dei minimi quadrati, si ottenne per la velocità in parola, il valore più probabile.

$$v = 5,63 \text{ km/sec.} \pm 0,004.$$

Si aveva così la conferma trattarsi di velocità apparente, nessuna onda superficiale ordinaria presentando una simile velocità.

3. Nel frattempo, si andarono moltiplicando le indagini intese a precisare l'andamento della velocità delle onde trasversali, nell'interno della Terra.

■ Mi limiterò a riportare il grafico relativo all'andamento ottenuto in alcune di dette indagini, fra il 1967 e il 1973 (figg. 1, 2) [7].

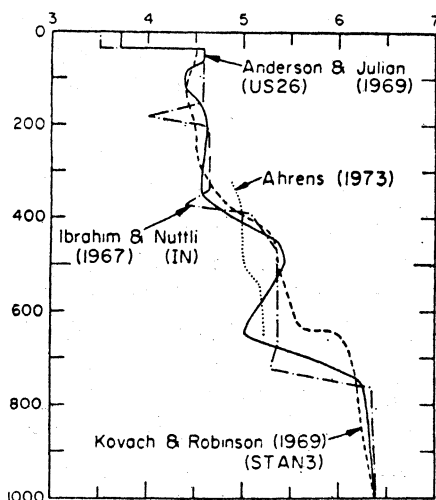


Fig. 1. - Modelli tratti da osservazioni di onde trasversali, confrontate con profili predisposti, basati su teoriche considerazioni mineralogiche. (Secondo Helmberger e Engen).

Il profilo ottenuto da Ibrahim e Nuttli nel 1967, presenta due zone a flessione di velocità al di sotto dell'astenosfera: fra i 350 e i 400 km la prima e intorno i 700 km la seconda. Tali zone però non appaiono molto attendibili, troppo spinta essendo la loro schematizzazione. Degli altri profili, solo quello calcolato da Don Anderson e Julian presenta flessioni di velocità oltre l'astenosfera: la prima, appena accennata, intorno ai 300 km e la seconda, marcatissima, fra i 500 e i 700 km ca.

Questo profilo presenta un estremo interesse, ai fini dell'interpretazione delle fasi senza qualifica, registrate in occasione di terremoti profondi, specialmente per profondità oltre i 600 km.

Osserviamo che il minimo di velocità per la flessione oltre i 600 km è fra 5,0 e 5,1 km/sec.: tale dev'essere il valore della velocità vera delle onde

trasversali, guidate dal corrispondente canale. E poiché tale minimo si verifica verso i 640 km di profondità, avremo - nota la velocità apparente $V_{S_{640}}$ in superficie -

$$v_{S_{640}} = 6370/5730 \cdot V_{S_{640}} = 5,07 \text{ km/sec.},$$

essendo $V_{S_{640}} = 5,63 \text{ km/sec.}$

Le fasi, di cui da tempo si perseguiva una causale, sono quindi chiarite nella loro origine: esse nascono nel canale che ha il suo minimo di velocità verso i 640 km e vengono da questo guidate nel loro tragitto interno, pervenendo ad impressionare la superficie esterna, grazie alla loro lunghezza d'onda, all'ampiezza del movimento (che, nel canale, dev'essere notevole) e alla plasticità del mezzo sovrastante.

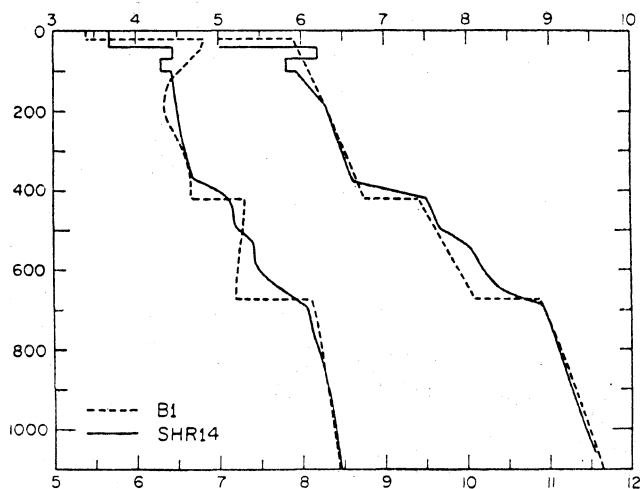


Fig. 2. - Confronto fra il modello SHR_{14} (tratto continuo) e il modello B_1 determinato dalle oscillazioni libere della Terra (Jordan e Anderson 1973). Secondo Helmberger e Engen.

Sono stati registrati chiari esempi di questo nuovo tipo di onda canalizzata dal Mar del Giappone all'Australia (Charters Towers) e alla Nuova Zelanda (Roxburg) attraverso il Pacifico orientale; meno accentuati a Victoria, Seattle e a Pasadena attraverso il Pacifico settentrionale; e a Resolute Bay, attraverso le regioni artiche. Quindi a Shillong, Calcutta, Bombay, Quetta, Ksara attraverso l'Asia; a Varsavia, De Bilt, Stoccarda, Trieste, Uccle, Strasburgo, Pavia, Roma attraverso l'Europa; e - talvolta poco sviluppate - a Ottawa, Florissant, Saint Louis, Halifax, Palisades attraverso l'America settentrionale. Se poi aggiungiamo che un altro terremoto profondissimo (660 km) dell'Argentina settentrionale (14 agosto 1950) ha fornito chiarissimi esempi delle nuove onde canalizzate a Huankayo, a Cleveland e a Roma [5] (cioè attraverso l'America Meridionale e l'Atlantico) possiamo asserire che questo canale-guida di energia sismica trasversale forma una corona sferica pressoché continua nell'interno della Terra.

Di particolare interesse si presenta la registrazione di Uccle, dove si susseguono dal 22.mo al 28.mo minuto tre gruppi d'onde: il primo (con inizio a 06.22.17 - tempo non corretto - e periodo di 26 sec. ca.) e il terzo (a

06.24.54 e periodo intorno a 18 sec.) attribuibili al canale oltre i 600 km di profondità e all'astenosfera - onde S_a - rispettivamente; e il secondo (a 06.23.25 e periodo fra 25 e 29 sec. ca.) probabile onda canalizzata dalla zona a flessione di velocità fra i 300 e i 400 km ca., quale risulta nei profili di Ibrahim e Nuttli (1967) e di Anderson e Julian (1969). La presenza di tali onde si riscontra pure a Resolute Bay, Ksara (Libano), Trieste, Roma, ecc. È quindi sopra tutto marcata in corrispondenza del continente euroasiatico: il relativo mantello sembra quindi corrispondere bene ai profili di velocità di Anderson-Julian.

4. Un'attenta analisi dei sismogrammi consente ulteriori conferme ed acquisizioni.

Va notato che l'ipocentro del terremoto si è verificato in un punto del canale libero, verso occidente, da infiltrazioni di zone di Benioff [3] (fig. 3)⁽¹⁾: è questo uno dei motivi che ha consentito chiare registrazioni di onde guidate dai canali fra 650 km e 150 km circa, per tutto il continente euroasiatico. L'azione d'assorbimento del canale a 650 km dovrà risultare tanto più attiva sulle onde S, quanto più queste ultime usciranno parallelamente alle superficie limite (ammessa un'irradiazione uniforme in tutte le direzioni).

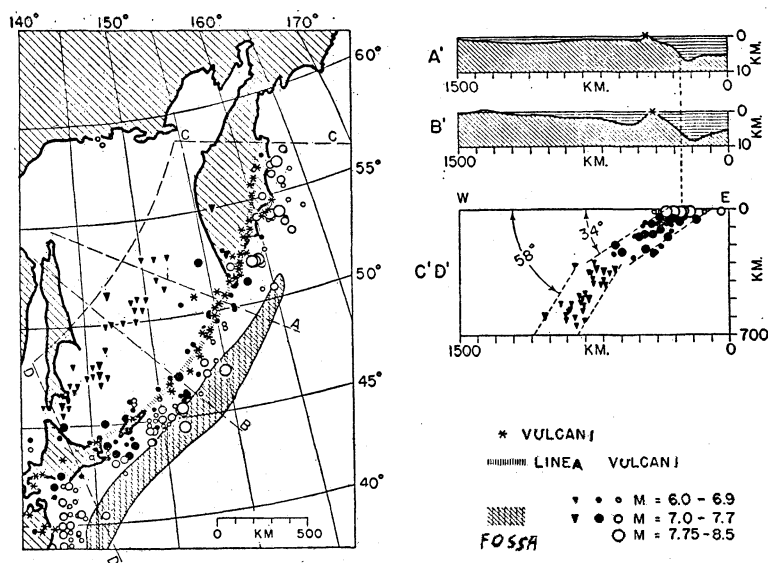


Fig. 3. - Mappa e profili della regione sismica Curili-Camtsiatka. A', B' sono i profili, verticalmente esagerati, presi lungo le linee A, B. Il profilo composito C'D' rappresenta la parte di mappa limitata da CC, DD. (Secondo H. Benioff).

(1) A questo proposito, va rilevato che oltre alla fascia di Benioff, relativa alla zona sismica Curili-Camtsiatka (fig. 3), ne esiste un'altra estesa corrispondente al segmento Bonin-Honshu, che nella sua base profonda taglia trasversalmente il Mar del Giappone, il Giappone, estendendosi fino all'isola di Bonin. Queste due zone sono pressoché a contatto in corrispondenza della costa russa, a Nord della Corea (H. BENIOFF, 1954 - *Orogeneses and deep-crustal Structure*, « Bull. Geologic. Soc. of America », 66, p. 389).

Per esempio, per 3000 km ca. di distanza epicentrale avremo una cattura di onde S maggiore di quella che si verifica a 6000 km di distanza. È ciò che effettivamente si verifica. Confrontiamo le registrazioni di Shillong (nell'Assam, alla base dell'Himalaya, a 1600 m di quota) e di Bombay: la prima stazione ha una distanza epicentrale di 3.800 km ca., mentre la seconda dista dall'epicentro 5900 km ca. Ebbene, nella prima stazione, la S ha ampiezza nettamente inferiore a quella della SS (e così a Calcutta, ad una distanza dello stesso ordine), mentre a Bombay si verifica il contrario: le S – in minor misura assorbite dal canale guida – sono nettamente più ampie delle SS (e delle SS), (fig. 4). È questa una chiara riprova dell'esistenza del canale stesso.

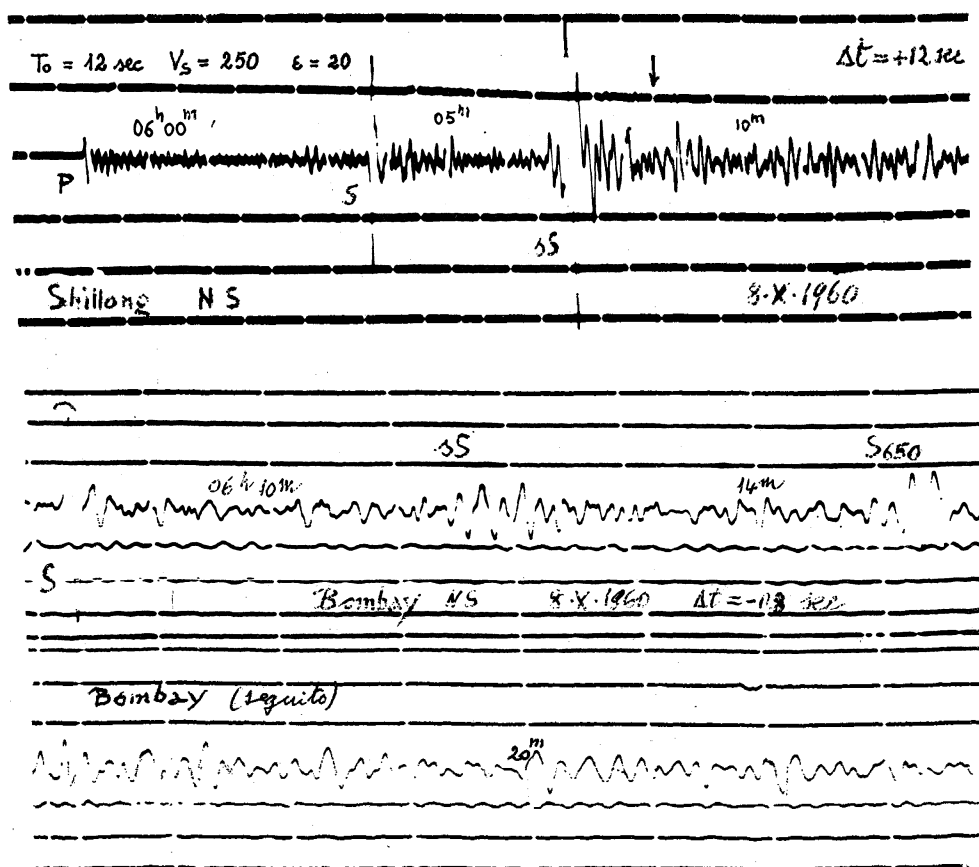


Fig. 4. — Questa, e le figg. 5 e 6, riportano tratti di registrazione, relativi al terremoto profondo del Mar del Giappone (8 ottobre 1960, $\varphi = 40^\circ$, $5N$; $\lambda = 120^\circ, 7E$; $H = 05^h 53^m 01^s, 1$; $h = 608 \text{ km}$). La stazione di Shillong ($\Delta = 3820 \text{ km}$) registra, sulla componente NS, in prevalenza onde SV. Si noterà che la S è di ampiezza inferiore alle sS: ciò sta a significare che la S è stata in parte canalizzata nello strato a flessione di velocità, con minimo di velocità verso i 650 km. A Bombay ($\Delta = 5880 \text{ km}$) la S risulta invece di ampiezza nettamente superiore alle sS; la lunga serie di gruppi d'onda dopo la S_{650} è probabilmente dovuta a parziale canalizzazione del gruppo delle sS.

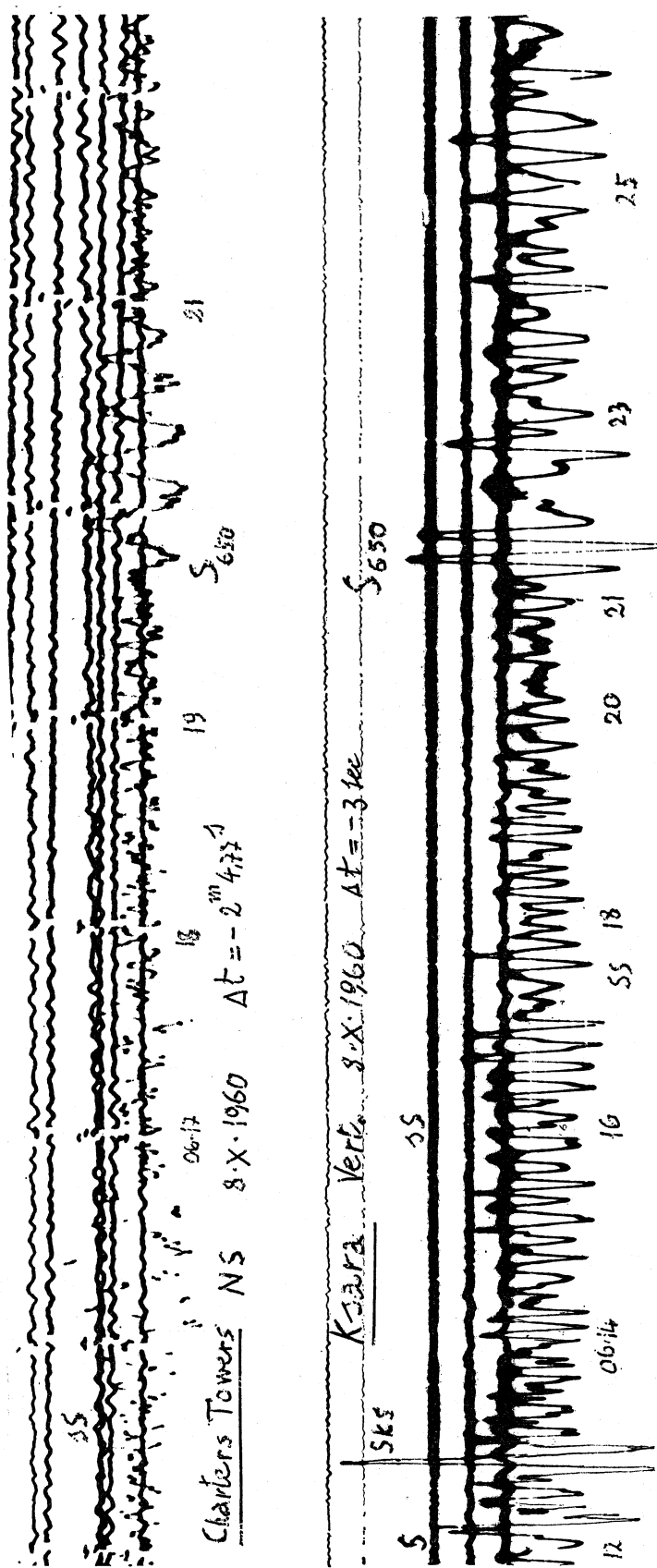


Fig. 5. - A Charters Towers (Australia) la comp. NS pressoché coincide con la direzione di provenienza. Alla distanza di 6855 km (distanza epicentrale) la S viene quindi fortemente canalizzata, com'è provato dall'ampio esempio di S_{650} . La registrazione, ottenuta dalla componente verticale a Ksara (Libano), alla distanza di 7980 km, è di notevole interesse. Come provano le ampie SKS, le S dovevano essere molto ampie all'origine. Nella registrazione, appaiono invece poco sviluppate (come pure le sS): ciò sta a significare della notevole canalizzazione subita dalle S, come è chiaramente provato, a partire dal 21.mo minuto, dall'ampia S_{650} , seguita da parziali canalizzazioni dello strato a flessione di velocità intorno i 400 km e della sovrastante astenosfera.

Alla stessa conclusione conduce il sismogramma ottenuto a Ksara (8.000 km): in questa stazione, l'SV della componente verticale è, in ampiezza inferiore all'SKS. Se si considera che l'SKS perde notevole energia durante il lungo tragitto, e due successive rifrazioni fra mantello e nucleo, associate a due mutamenti di natura (da trasversali e longitudinali e viceversa), se ne deve concludere che la percentuale di energia, animante la SV, assorbita dal canale C_{650} , è – per questa distanza – davvero notevole: ciò del resto, è reso manifesto dall'ampiezza e dalla lunga successione di onde canalizzate, che giungono in superficie dal 21.mo al 26.mo minuto, guidate dai canali del mantello superiore, e sulle quali non è escluso un contributo di SS canalizzate.

Da questo punto di vista, quello di Ksara (fig. 5) è un sismogramma di eccezionale interesse.

Una citazione a parte merita la stazione di Palisades (New York), alla distanza di 10730 km. La direzione di provenienza delle onde sismiche non è molto discosta dal Nord: sicché, mentre la NS registra le SV, le SH figurano sulla componente EW.

Va sottolineato il fatto che, all'origine, certamente la SV era presente con notevole energia: la riprova è data dalla chiara registrazione di onde SKS sulla componente NS (e solo su questa). Per quanto riguarda le S, la loro presenza è poco più che una traccia sulla comp. NS, mentre risulta molto ampia sull'EW.

Ciò non autorizza a concludere che il C_{650} non cattura onde trasversali-tangenziali (anche le sS, le SS e le sSS figurano molto ampie sull'EW); le SV, d'altronde, hanno scarsa rilevanza anche come onde canalizzate: la causa di ciò va ricercata nel fatto che – come si è detto – l'ipocentro figura in una posizione prossima alla confluenza di tre profonde zone di Benioff.

A questo riguardo, va osservato che, l'esistenza di una successione di zone di Benioff attorno all'ipocentro, da NE a E e SE, ha fortemente alterato il fenomeno di canalizzazione nell'America Settentrionale, riducendolo in modo sensibile. Forse si spiega così la mancata (o ridotta) canalizzazione delle SH. Nel caso di Palisades, poi, la notevole distanza (10.733), richiede per le S un'uscita dall'ipocentro con angolo molto acuto sul Nadir; il che consente alle SH di sfuggire, in notevole misura, dal canale a 650 km di profondità. Considerazione analoga per le sSH e per le sSS.

D'altronde, per simili distanze, è da ritenere che l'energia di canalizzazione sia di molto attenuata.

5. Il canale in discussione presenta, d'altra parte, caratteristiche particolari. Come è noto, l'astenosfera canalizza onde longitudinali e trasversali, in quanto la flessione di velocità interessa sia le longitudinali che le trasversali, sia pure con minimi a diversa profondità.

Il canale oltre i 600 km non conduce onde longitudinali – o, per lo meno, così sembra –, in quanto la zona da esso interessata presenta flessione di velocità per le sole onde trasversali. Anche questa volta le osservazioni

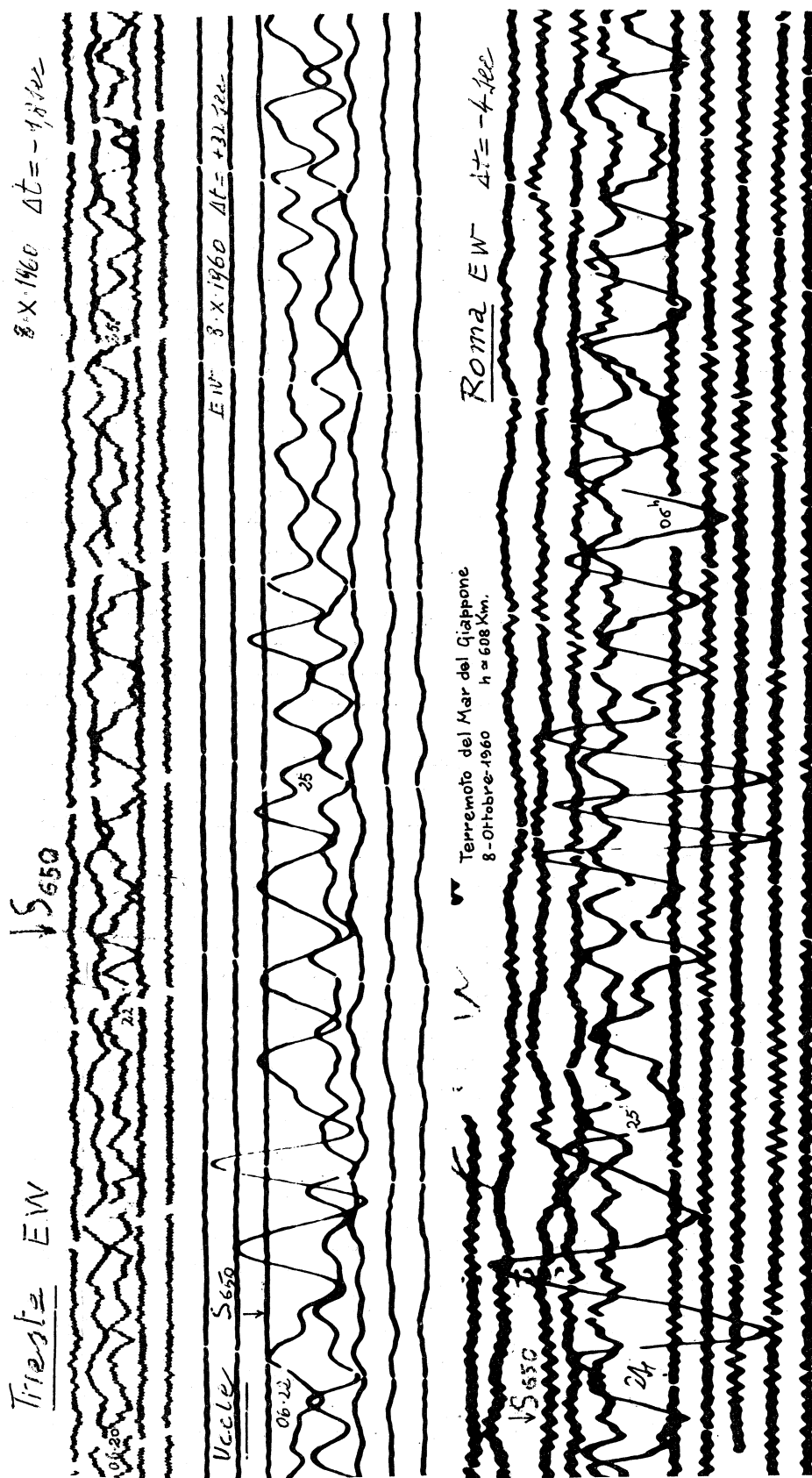


Fig. 6. - Nelle stazioni di Trieste ($\Delta = 8590 \text{ km}$), Uccle ($\Delta = 8635 \text{ km}$) e Roma ($\Delta = 8955 \text{ km}$) si hanno ulteriori, chiarissimi esempi di onde S_{650} fortemente canalizzate, seguite da onde guidate dai canali superiori (astenofera compresa).

sono confortate dai recenti studi sulla propagazione delle onde elastiche nell'interno della Terra. L'andamento della velocità delle onde longitudinali nell'interno del pianeta, nelle ricerche compiute nell'ultimo decennio, non presenta infatti flessioni apprezzabili; la velocità vi figura sempre in aumento (naturalmente, fatta eccezione per l'astenosfera). Anche il modello di Jordan e Anderson (1973), tratto dalle libere oscillazioni della Terra, mentre conferma il canale per le onde S oltre i 600 km, come da fig. 2, per quanto concerne le onde P, contempla solo aumento di valori. Va comunque rilevato che, nel modello SHR14 di Helmberger e Engen (1974) [7], la velocità delle P presenterebbe fra i 500 e i 700 km ondulazioni tali, da consentire (forse) – in favorevoli condizioni – fenomeni di canalizzazione.

Il canale delle onde SV oltre i 600 km, allo stato attuale delle conoscenze, si presenta quindi dotato di una singolare proprietà: non conduce le onde longitudinali. Questo fatto si risolve nella constatazione che, nella zona interessata, si ha contemporaneamente un aumento della velocità delle onde longitudinali ed una sensibile diminuzione di quella delle onde trasversali. Facendo ricorso alle costanti di Lamé λ e μ , se σ è il rapporto di Poisson, si ha

$$\lambda = \frac{2\mu\sigma}{1 - 2\sigma}.$$

Il fatto che la velocità delle onde longitudinali aumenti malgrado la diminuzione di μ , sta a provare che λ cresce più di quanto non diminuisca μ : in altri termini, nel mezzo, al diminuire della rigidità, aumenta sensibilmente l'incompressibilità.

Tali caratteristiche dipendono evidentemente dalla temperatura, dalla pressione e dai mutamenti di fase che si osservano nella zona. Per quanto riguarda il Nord America, furono fatte indagini con modelli teorici.

Akimoto e Fujisawa [1] hanno studiato l'equilibrio di soluzioni solide olivina-spinello nel sistema $\text{Mg}_2\text{SiO}_4 - \text{Fe}_2\text{SiO}_4$ a pressione di 92 kb e a composizione a 60 mole-percentuale di Mg_2SiO_4 . L'estrapolazione dei risultati ottenuti dai due giapponesi, consente a Don Anderson di stimare la pressione delle transizioni di olivina-spinello in puro Mg_2SiO_4 a 150 ± 10 kb, alla temperatura di 800 °C [2]. Don Anderson spiega pertanto le variazioni di velocità alle profondità di 400 e 600 km ca., in termini di cambiamento di fase olivina verso spinello per la prima profondità e di spinello alla fase post spinello in corrispondenza della seconda profondità.

Resta comunque inspiegabile come, una così marcata diminuzione di velocità delle onde S al disotto dei 660 km di profondità, non sia accompagnata da una flessione di velocità delle onde P, come invece si verifica per l'astenosfera.

In questi fenomeni, oltre alle condizioni di pressione, temperatura, ecc. deve giocare un ruolo determinante la natura fisico-chimica del mezzo.

6. L'insospettata esistenza di un canale-guida di energia sismica associata alle onde SV, alla profondità dell'ordine di 650 km, non mancherà

di suscitare ricerche atte a condurre ad ulteriori chiarimenti sulla natura fisico-chimica del mantello terrestre. Il fatto che tale energia - sia pure associata ad onde con periodi elevati - possa impressionare la superficie esterna della Terra, aggiunge nuovi incentivi allo studio delle onde canalizzate e alla spiegazione dell'effetto che consente a tali onde di impressionare la crosta terrestre. In tale effetto, un ruolo importante deve giocare la viscosità e la plasticità del mantello superiore.

RICHIAMI BIBLIOGRAFICI

- [1] S. AKIMOTO and H. FUJISAWA (1966) - *Earth and Planetary Science Letters*, 1, 237.
- [2] DON L. ANDERSON (1967) - *Phase Changes in the Upper Mantle*, « Science », 157, n. 3793, 1165-1173.
- [3] HUGO BENIOFF (1955) - *Seismic Evidence for Crustal Structure and Tectonic Activity*, « Geological Society of America-Special Paper », 62, 61-74.
- [4] P. CALOI (1953) - *Onde longitudinali e trasversali guidate dall'astenosfera*, « Rend. Accad. Naz. Lincei, Cl. Sc. fis., mat. e nat. », 15, 352-357.
- [5] P. CALOI (1965) - *On the canalization of seismic energy*, « Ann. di Geofisica », 16, 167-175.
- [6] P. CALOI (1967) - *On the Upper Mantle*, « Academic Press », New York. In « Advances in Geophysics », 12, 167-175.
- [7] D. V. HELMBERGER and GL. R. ENGEN (1974) - *Upper Mantle Shear Structure*, « Journ. of Geophys. Research », 79, 4017-4028.