

# L'ASTENOSFERA COME CANALE-GUIDA DELL'ENERGIA SISMICA (\*)

PIETRO CALOI

1. — Da qualche anno avevo osservato, interpretando numerose registrazioni di terremoti lontani, la presenza di certe onde fra le *P* e le *S*, e fra le *S* e le *L* che non potevano essere, in nessun modo, classificate fra le fasi conosciute: né onde riflesse, né onde superficiali.

Un'osservazione più attenta, mi aveva poi condotto a concludere che quegli sconosciuti tipi d'onda venivano registrati specialmente in occasione di terremoti originanti al disotto della crosta terrestre, fra 50 e 250 Km ca. di profondità.

Seguita la propagazione dei due distinti gruppi, per terremoti singoli, potei convincermi che essi si propagavano con media velocità costante: il primo del valore di 8.0 Km/sec ca, il secondo di ca. 4,4 Km/sec.

Ciò ebbi modo di constatare per parecchi terremoti.

Dovetti allora convincermi trattarsi di onde — longitudinali e trasversali — che, in qualche modo, nella loro propagazione, seguivano la zona limitata superiormente dalla crosta terrestre.

Una spiegazione teorica del meccanismo di formazione di queste onde poteva anche essere ricercata in un lavoro di J. H. Jeans (« The Propagation of Earthquake Waves ». Roy. Soc. Proc., A, Vol. CII, pag. 554), sulla propagazione delle onde sismiche. Ma, considerazioni ovvie, portavano ad escludere che le onde in questione potessero identificarsi con quelle di cui discute Jeans, particolarmente a pag. 572 del suo notevole lavoro.

Data la profondità dei terremoti, in occasione dei quali queste onde originano e si propagano alle massime distanze, una spiegazione molto attendibile mi venne pressoché spontaneo di formulare.

È noto che le ricerche di Gutenberg hanno provato, con testimonianze numerose dal 1927 ad oggi, l'esistenza di una spessa zona

---

(\*) Comunicazione presentata alla « Association Internationale de Séismologie et Physique de l'intérieur de la Terre » nella X Assemblea Generale dell'U.G.G.I. - Roma 1954.

sotto la crosta terrestre, dove la velocità di propagazione delle onde sismiche spaziali decresce lentamente con la profondità, che raggiunge il suo minimo fra gli 80 e i 100 Km, per tornare quindi a crescere altrettanto lentamente.

È quella zona — che va dai 40 ai 300 Km circa —, a cui Daly ha dato il nome di « astenosfera ».

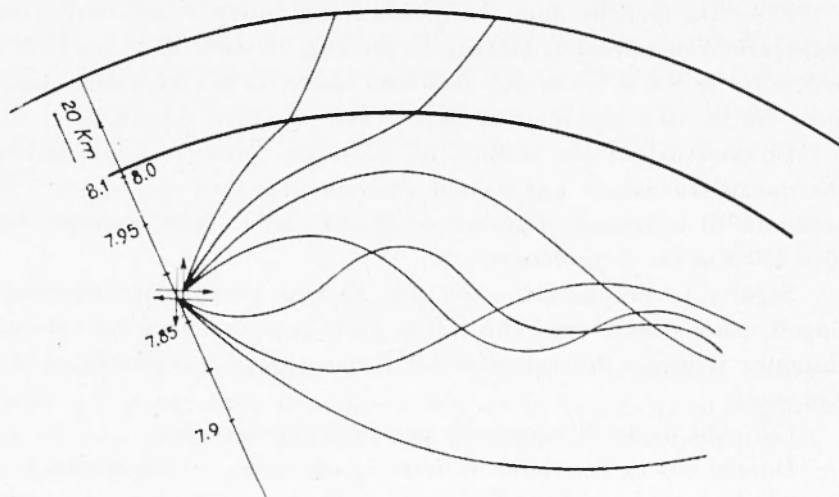


Fig. 1

Ebbene, a questa *flessione* di velocità può senz'altro essere attribuita l'origine del fenomeno osservato. Ed è ciò che non ho esitato ad esporre in una recente nota, presentata all'Accademia Nazionale dei Lincei (<sup>1</sup>).

È chiaro infatti che uno strato sferico a flessione di velocità (quello che gli americani chiamano, con locuzione piuttosto imprecisa, « a low velocity layer ») presenta le condizioni atte a consentire la guida dell'energia sismica: basta che questa le venga, per così dire, immessa parallelamente alle sue superficie limiti o, comunque, con inclinazioni tali da obbligarla a ritornare ritmicamente nell'interno dello strato, perché la sua propagazione possa avvenire alle massime distanze (fig. 1).

Non è escluso inoltre che il gioco di rifrazioni e riflessioni possa

condurre parte dell'energia uscente da un centro di scotimento, interno alla crosta terrestre, ad essere «catturata» dall'astenosfera.

È chiaro però che le condizioni più favorevoli per la guida del massimo possibile di intensità sismica da parte dell'astenosfera, si

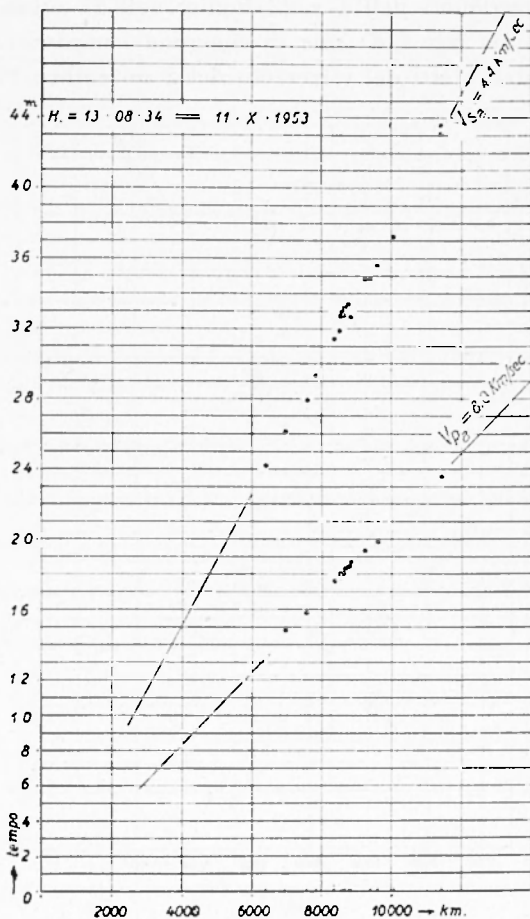


Fig. 2

verifica quando un terremoto ha origine nell'astenosfera stessa. Ecco perché solo i terremoti con profondità ipocentrali fra 50 e 250 Km danno chiari esempi di onde longitudinali ( $P_n$ ) e trasversali ( $S_n$ ), guidate dall'astenosfera.

2. — L'esemplificazione di onde  $P_n$  ed  $S_n$  è ormai copiosa.

Per una raccolta di dati che mi consentissero di tracciare le relative dromocrone, ho limitato la mia attenzione a cinque terre-

moti; uno già in precedenza studiato in collaborazione col Dott. Peronaci e gli altri quattro avvenuti di recente (il 1° e il 22 luglio, l'11 ottobre e il 10 novembre 1953).

Le figg. 2 e 3 danno i tempi di propagazione delle onde  $P_n$  ed  $S_n$  relativi ai terremoti dell'1 e 22 luglio, dell'11 ottobre e del 10 novembre 1953; la fig. 4 dà una dromocrona complessiva, comprendente anche i dati tratti dal terremoto del 2 novembre 1946.

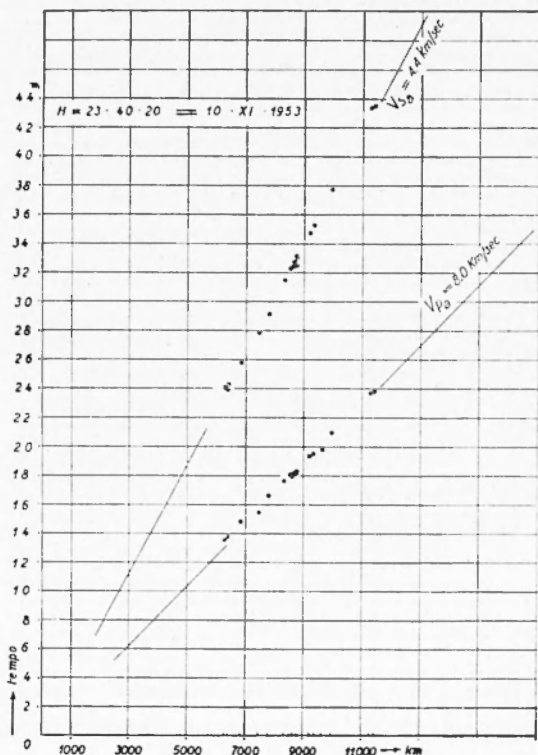


Fig. 3

Le figg. 5-17 riproducono alcuni esempi di onde  $P_n$ ,  $S_n$ , registrate in diverse distanze.

I quattro terremoti del 1953 furono di media intensità, e pertanto registrati chiaramente solo da apparecchi a forte ingrandimento. Dato il periodo relativamente lungo delle  $P_n$  e — più ancora — delle  $S_n$ , particolarmente indicati per la registrazione di dette onde risultano gli apparecchi Galitzin a lungo periodo (Roma, Strasbourg, Uccle, De Bilt, Kew), oltre a sismografi di altro tipo pure a lungo periodo (Parigi, Pasadena, Tamanrasset, Palisades ecc.).

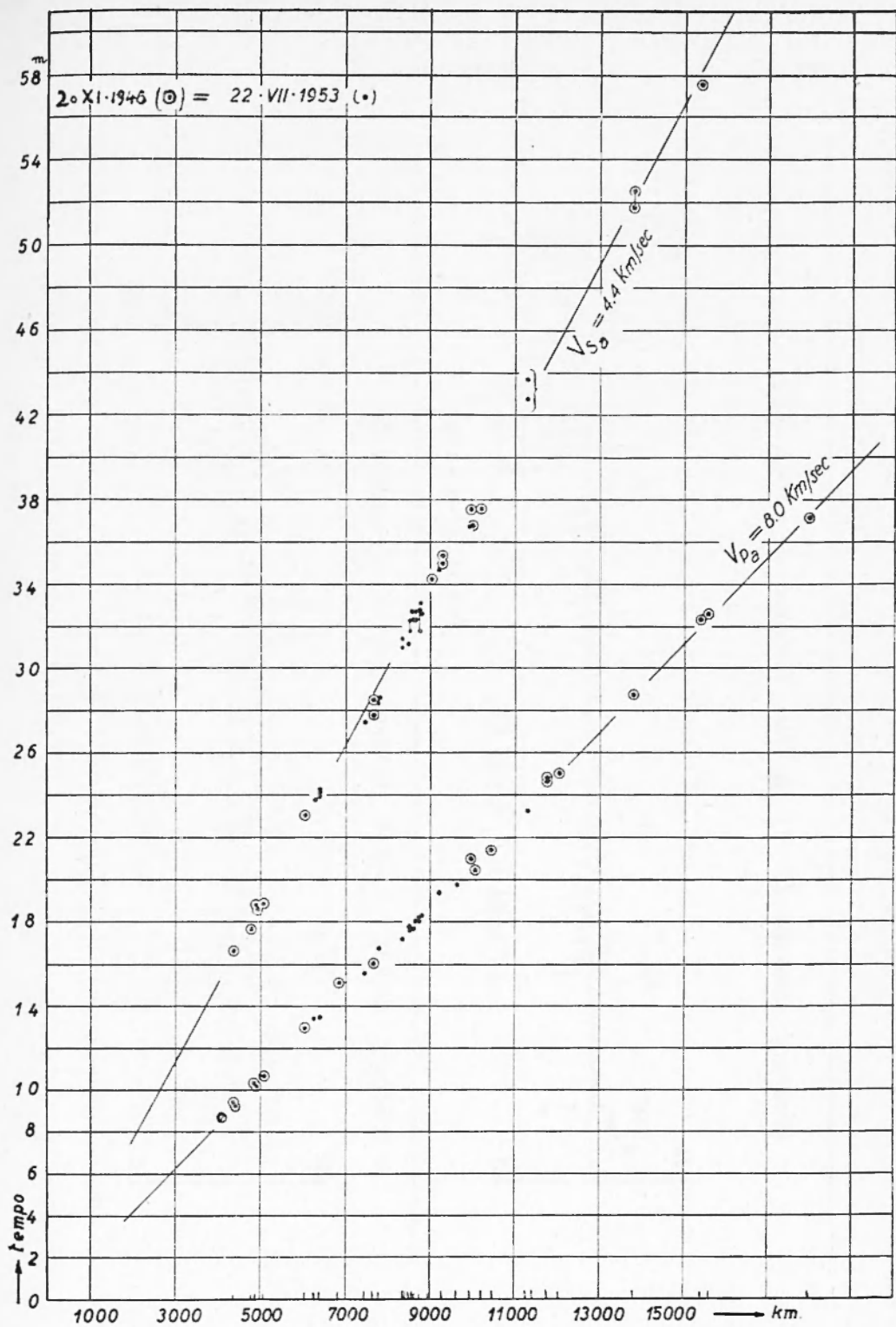
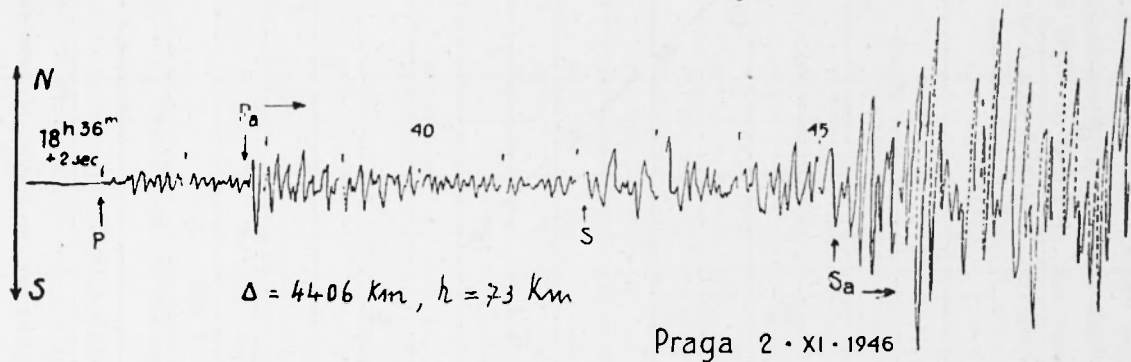


Fig. 4

Wiechert 1000 kg  $T_0 = 9,5^s$   $V_0 = 211$   $\epsilon = 4,5:1$   $\frac{r}{T_0^2} = 0,003_3 \frac{mm}{sec^2}$



Wiechert 1000 kg.  $T_0 = 9,5^s$   $V_0 = 193$   $\epsilon = 4,7:1$   $\frac{r}{T_0^2} = 0,003_3 \frac{mm}{sec^2}$

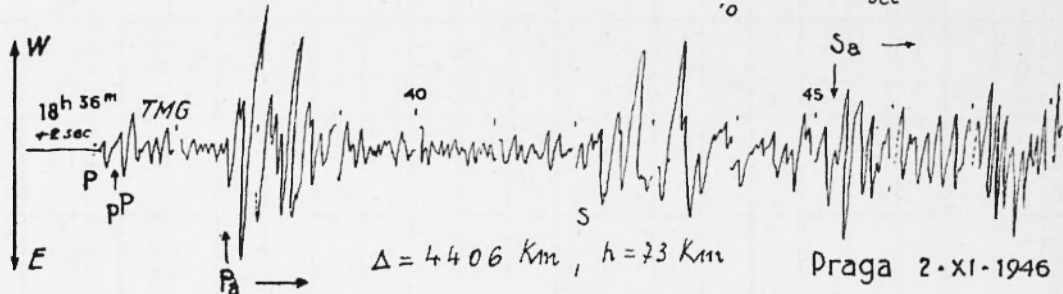


Fig. 5

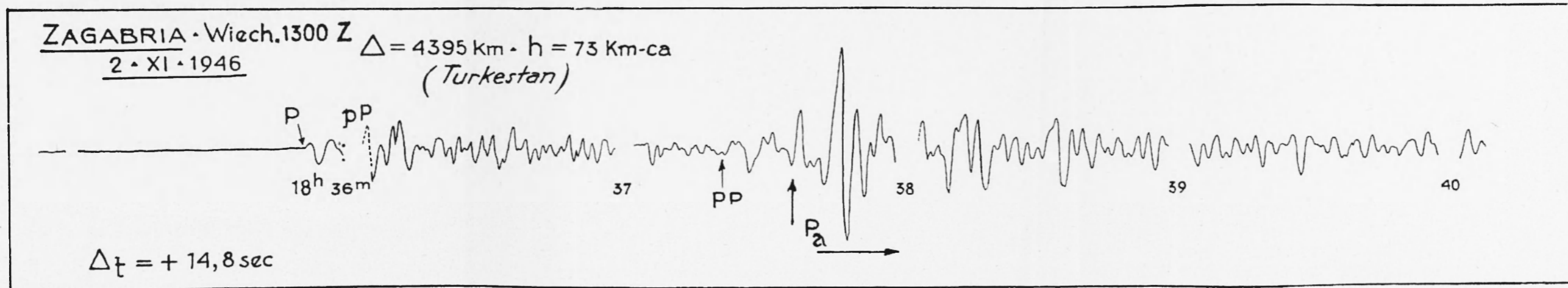
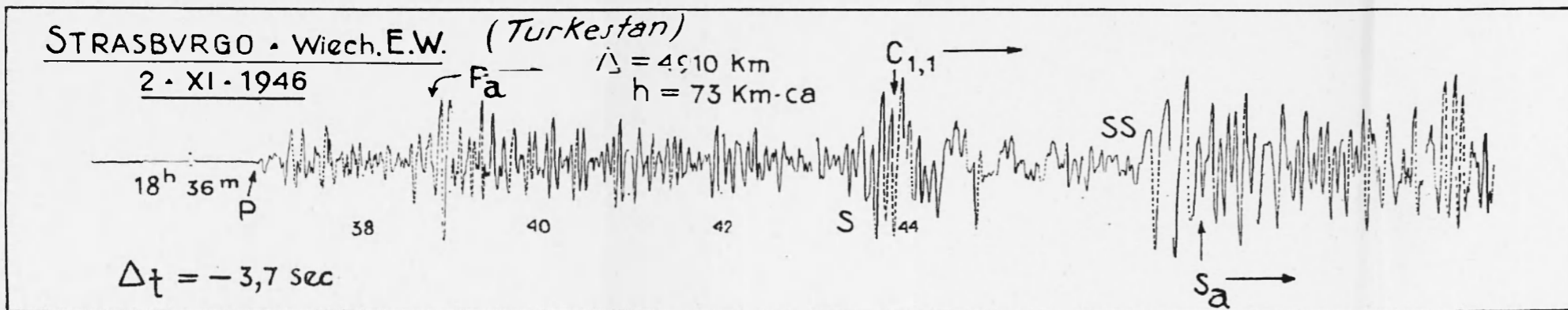
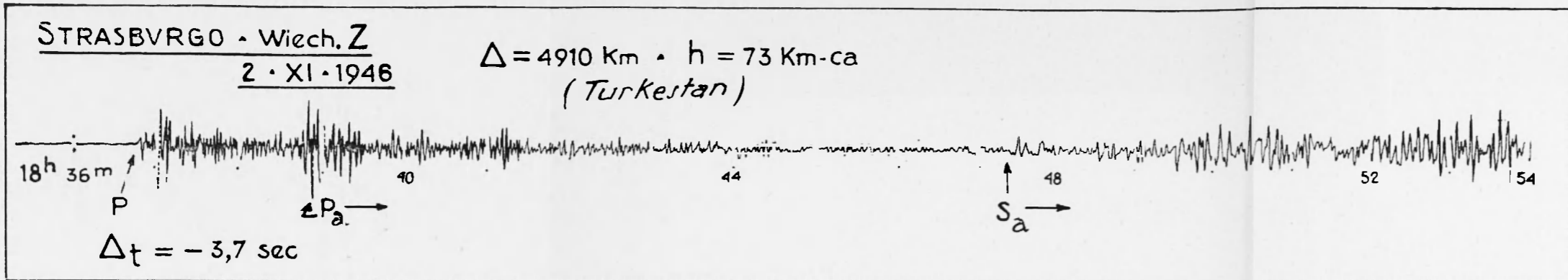


Fig. 6

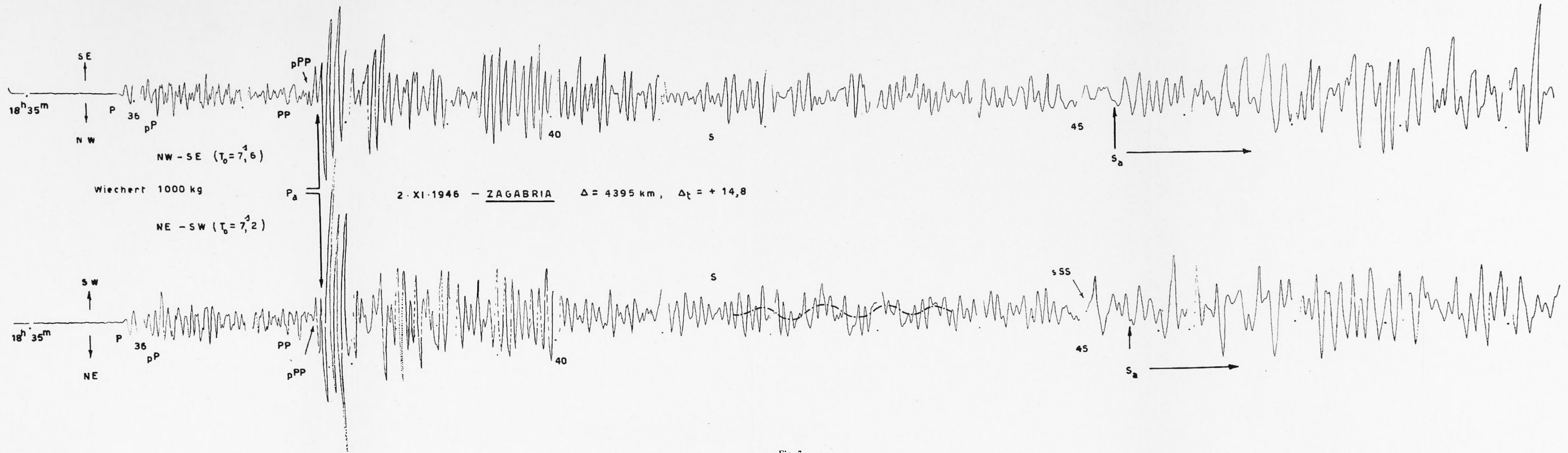


Fig. 7



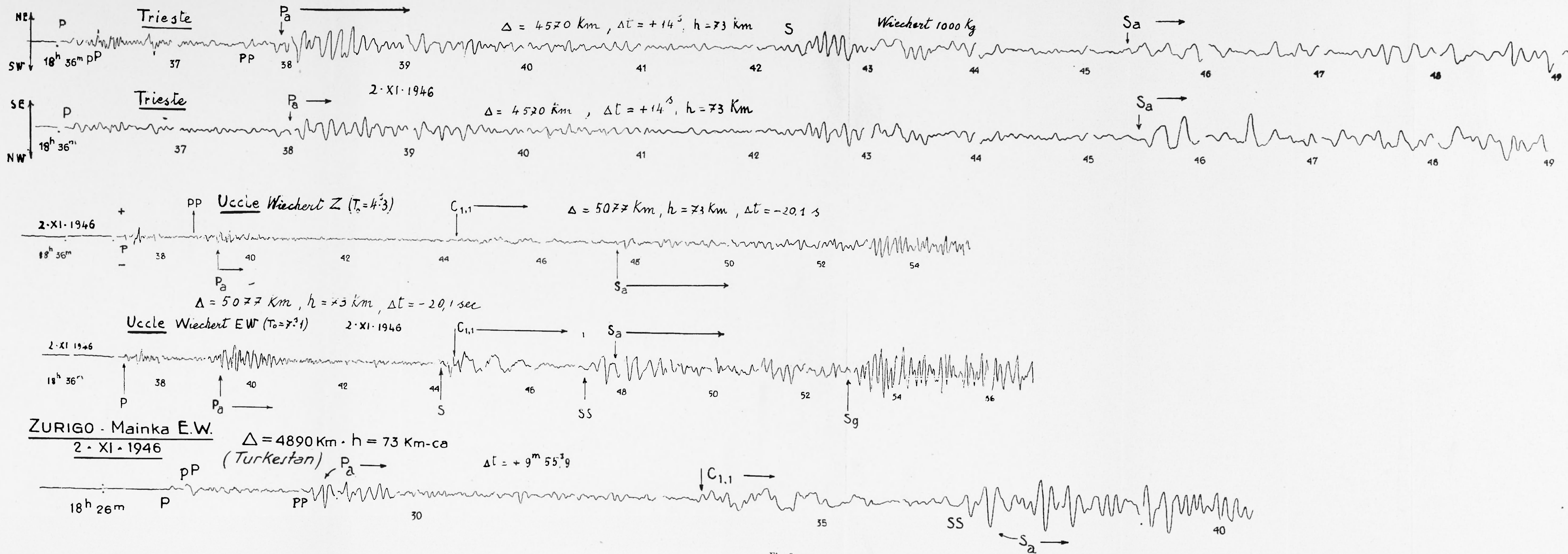


Fig. 8

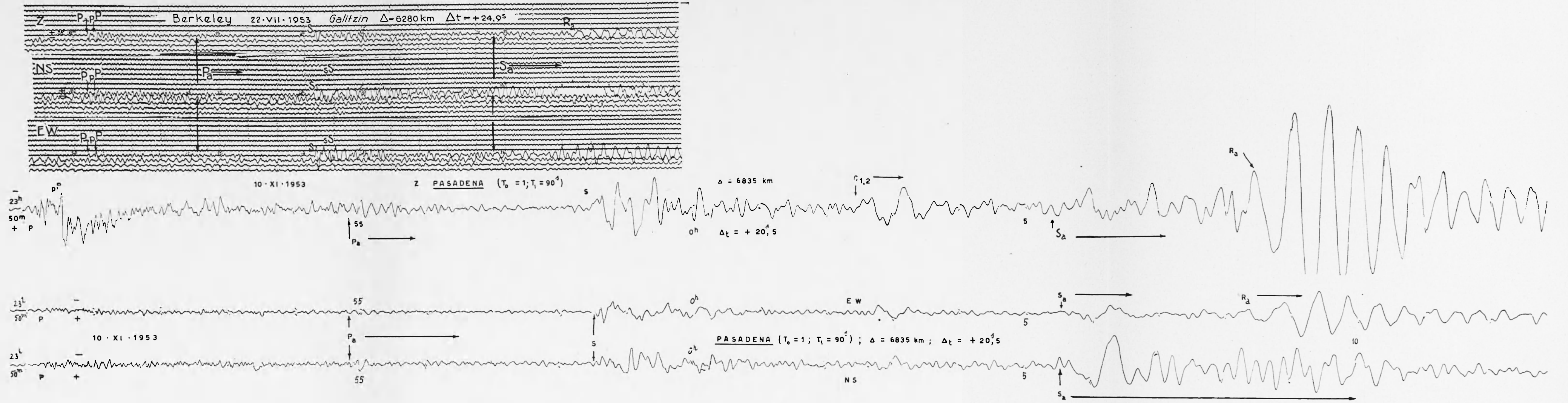


Fig. 9

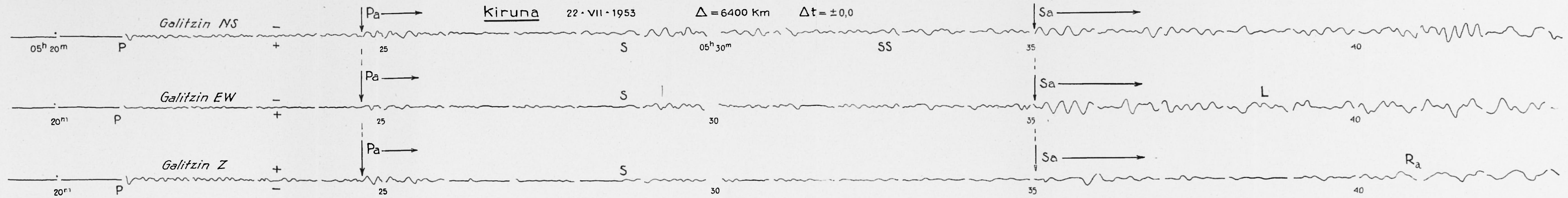


Fig. 10



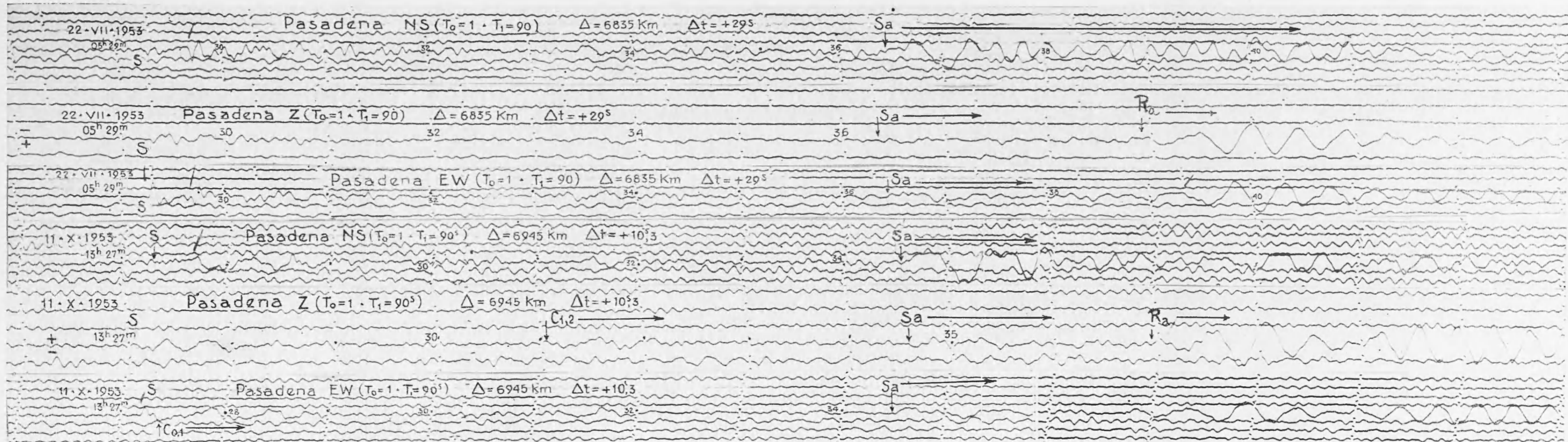


Fig. 11





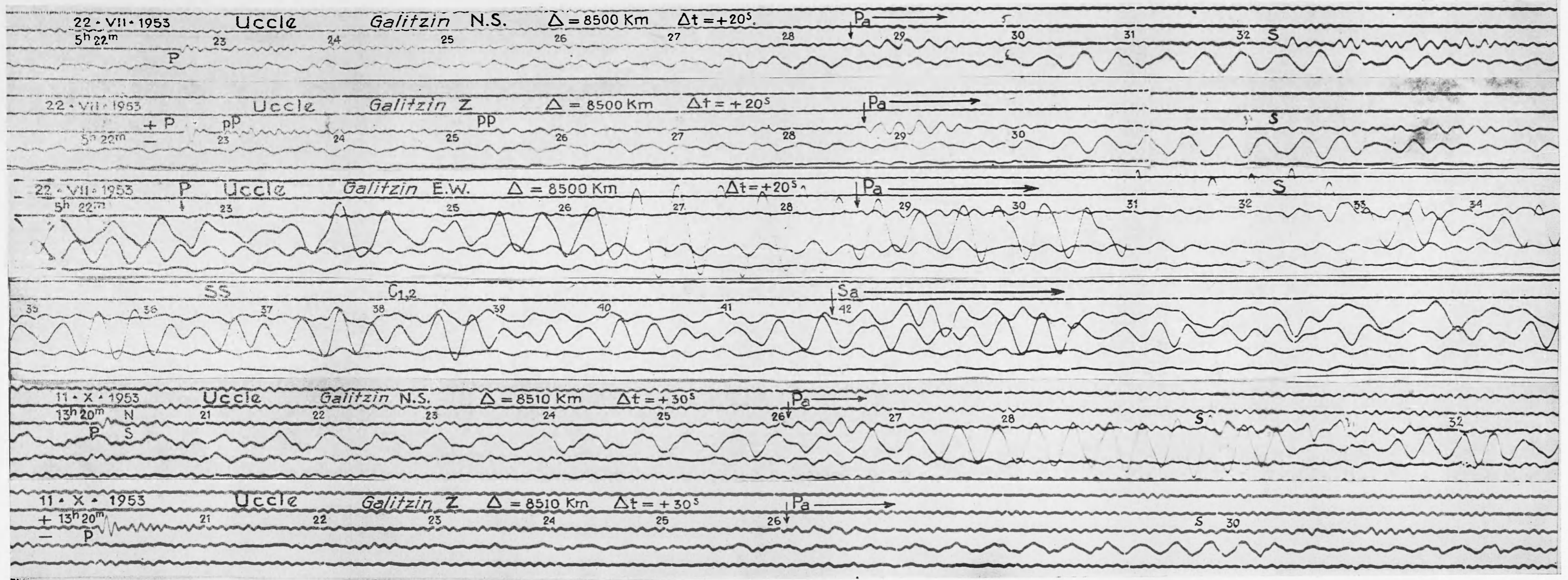


Fig. 13

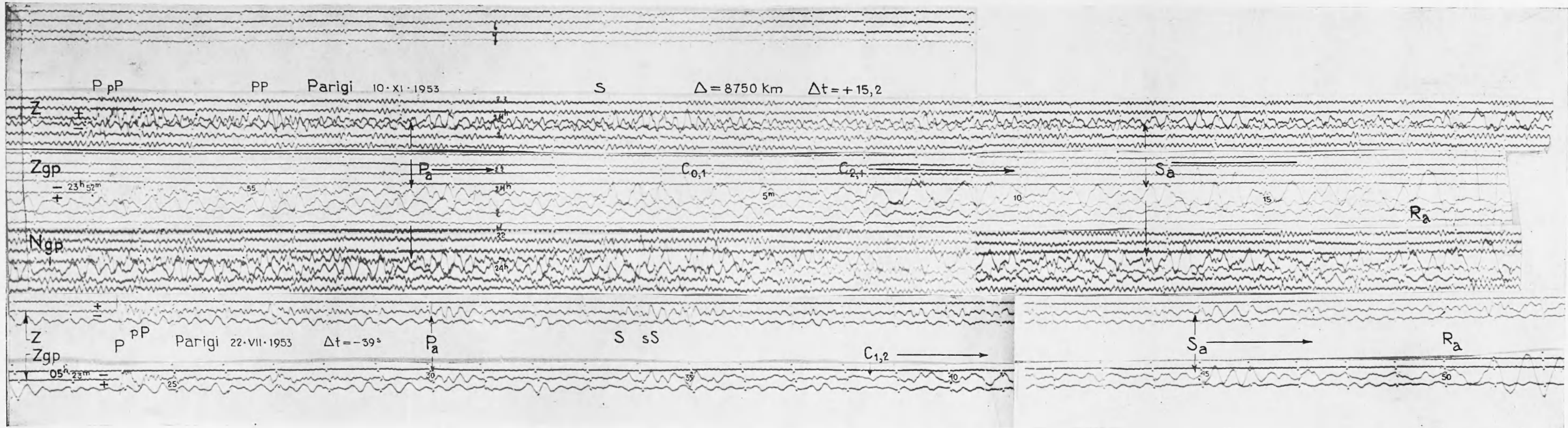


Fig. 14



Roma

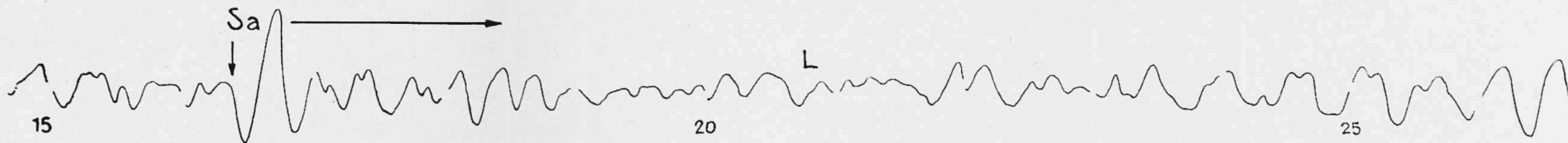
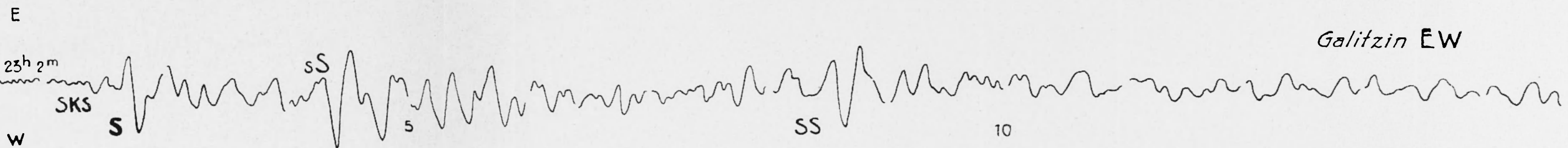
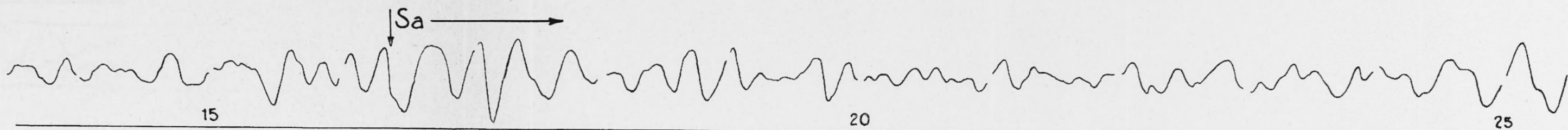
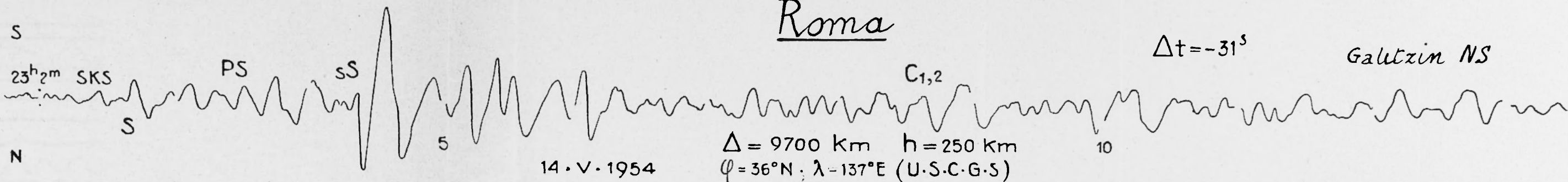


Fig. 15



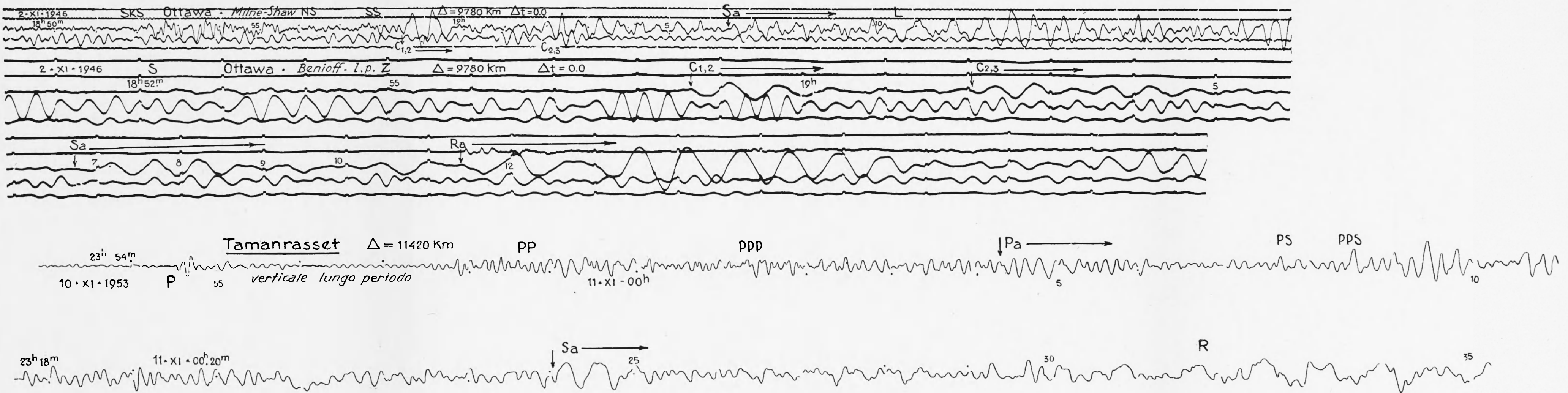


Fig. 16

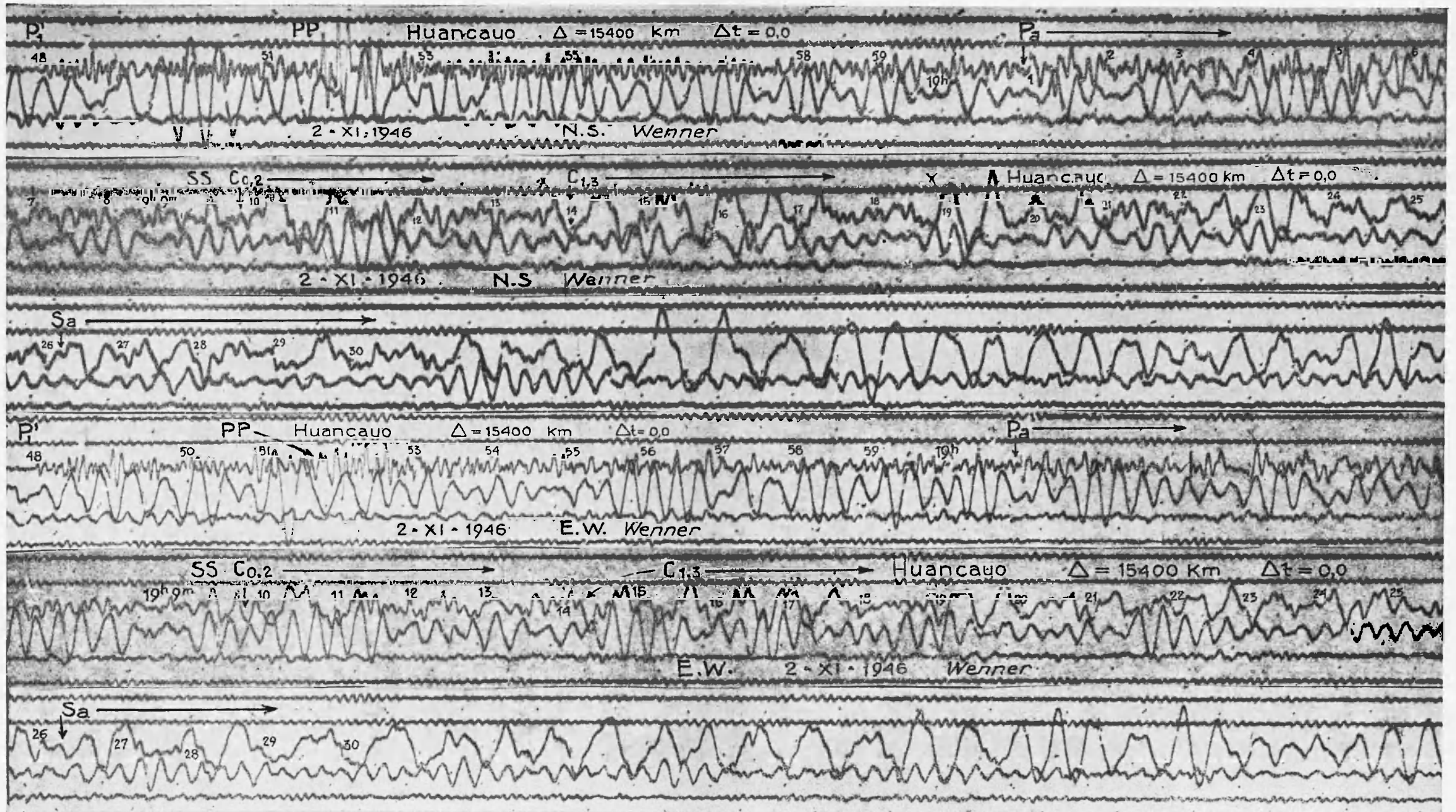


Fig. 17

Anche i normali apparecchi Galitzin e Galitzin-Wilip forniscono ottimi esempi di onde  $P_n$  ed  $S_n$ . Si notino p. es., le registrazioni di Kiruna (fig. 10).

3. — Che l'ipotesi circa l'origine di queste onde guidate dalla astenosfera sia giusta, può essere provato anche per via indiretta.

Si è detto che quanto più l'energia sismica, proveniente da un centro di scotimento dell'astenosfera, si propaga secondo direzioni parallele alle superficie limiti, tanto meglio l'energia stessa verrà convogliata dall'astenosfera. Nei casi più favorevoli, esisterà un angolo solido, con centro nell'ipocentro, di disposizione ed ampiezza tali che tutti i raggi sismici in esso compresi saranno obbligati a restare nell'astenosfera.

Pertanto, per certi terremoti, *per distanze epicentrali varianti entro certi limiti, non dovranno praticamente aversi registrazioni di onde PP o PPP, mentre appariranno particolarmente nette le onde  $P_n$ .*

In altri termini, potremo avere distanze epicentrali tali da consentire all'astenosfera di «catturare» — per così dire — gran parte dell'energia sismica che, in condizioni normali, sarebbe stata destinata alla formazione delle onde PP e PPP. Questa energia viene invece convogliata sotto forma di onde  $P_n$ .

Ebbene, di questi casi posso citarne parecchi. Mi limiterò a quelli riportati nelle figg. 5, 7, 10, 13, che risultano particolarmente significativi; in essi, infatti le onde longitudinali riflesse vi figurano solo come tracce, mentre evidenti appaiono le onde  $P_n$ . Osservazione analoga per le  $S_n$ .

4. — L'energia sismica guidata dall'astenosfera permette di chiarire un'altra anomalia, rimasta finora senza spiegazione: il notevole anticipo, cioè, con il quale vengono registrate sovente le onde di Rayleigh. Ho osservato che questo anticipo si verifica sempre per terremoti originanti nell'astenosfera e che, in questi casi, i tempi di arrivo sono del tutto conformi a quelli che ci si deve attendere dalla teoria, sulla base della velocità media delle onde  $S_n$ , proprie dell'astenosfera stessa. Si tratta quindi di onde di Rayleigh guidate dall'astenosfera: gli anticipi sui tempi di tragitto che queste onde presentano per la crosta terrestre crescono naturalmente con la distanza. Le figg. 9, 11, 14, 16 danno chiari esempi di onde di Rayleigh ( $R_n$ ) proprie del canale astenosferico.

Roma — Istituto Nazionale di Geofisica — Agosto 1954.

## RIASSUNTO

Da qualche anno avevo osservato, interpretando numerose registrazioni di terremoti lontani, la presenza di certe onde fra le P e le S e fra le S e le L che non potevano essere, in nessun modo, classificate fra le fasi conosciute: né onde riflesse, né onde superficiali.

Un'osservazione più attenta, mi aveva poi condotto a concludere che quegli sconosciuti tipi d'onda venivano registrati specialmente in occasione di terremoti originanti al disotto della crosta terrestre, fra 50 e 250 Km ca.

Seguita la propagazione dei due distinti gruppi, per terremoti singoli, potei convincermi che essi si propagavano con media velocità costante: il primo del valore di 8,0 Km/sec ca., il secondo di ca. 4,4 Km/sec.

Ciò ebbi modo di constatare per parecchi terremoti.

Dovetti allora convincermi trattarsi di onde — longitudinali e trasversali — che, in qualche modo, nella loro propagazione seguivano la zona limitata superiormente dalla crosta terrestre.

Data la profondità dei terremoti, in occasione dei quali queste onde originano e si propagano alle massime distanze, mi venne pressoché spontaneo di formulare la seguente spiegazione, che comunicai nel novembre 1953 all'Accademia Naz. dei Lincei.

E noto che ricerche di Gutenberg hanno provato, con testimonianze numerose dal 1927 ad oggi, l'esistenza di una spessa zona sotto la crosta terrestre, dove la velocità di propagazione delle onde sismiche spaziali decresce lentamente con la profondità, che raggiunge il suo minimo fra gli 80 e i 100 Km, per tornare quindi a crescere altrettanto lentamente.

È quella zona — che va dai 40 ai 300 Km ca. —, a cui è dato il nome di « astenosfera ».

Ebbene, a questa flessione di velocità può senz'altro essere attribuita l'origine del fenomeno osservato.

È chiaro infatti che uno strato sferico a flessione di velocità (quello che gli americani chiamano, con locuzione piuttosto imprecisa, « a low velocity layer ») presenta le condizioni atte a consentire la guida dell'energia sismica: basta che questa le venga, per così dire, immessa parallelamente alle superficie limiti o, comunque, con inclinazioni tali da obbligarla a ritornare ritmicamente nell'interno dello

strato, perché la sua propagazione possa avvenire alle massime distanze.

Che l'ipotesi circa l'origine di queste onde guidate dalla astenosfera sia giusta, può essere provato anche per via indiretta.

Si è detto che quanto più l'energia sismica, proveniente da un centro di scotimento dell'astenosfera, si propaga secondo direzioni parallele alle superficie limiti, tanto meglio l'energia stessa verrà convogliata dall'astenosfera. Nei casi più favorevoli, esisterà un angolo solido, con centro nell'ipocentro, di disposizione ed ampiezza tali che tutti i raggi sismici in esso compresi saranno obbligati a restare nell'astenosfera.

Pertanto, per certi terremoti, per distanze epicentrali varianti entro certi limiti, non dovranno praticamente aversi registrazioni di onde PP o PPP, mentre appariranno particolarmente nette le onde  $P_n$ .

In altri termini, potremo avere distanze epicentrali tali da consentire all'astenosfera di « catturare » — per così dire — gran parte dell'energia sismica che, in condizioni normali, sarebbe stata destinata alla formazione delle onde PP e PPP. Questa energia viene invece convogliata sotto forma di onde  $P_n$ .

Ebbene, di questi casi ne vengono qui riportati parecchi, di particolarmente significativi; in essi infatti le onde longitudinali riflesse vi figurano solo come tracce, mentre evidenti appaiono le onde  $P_n$ . Osservazione analoga per le  $S_n$ .

L'astenosfera, inoltre, com'è provato in questo lavoro, conduce pure onde di Rayleigh ( $R_n$ ), che anticipano sensibilmente — a seconda della distanza epicentrale — sulle analoghe onde della crosta terrestre.

## SUMMARY

In the interpretation of many recordings of distant earthquakes, there has been observed for some years, the presence of certain waves between the P and the S and between the S and the L waves which could not in any way be classified among the known phases; they were neither reflected nor surface waves.

Closer observation lead to the conclusion that these unknown types of waves were especially evident on the occasion of earthquakes originating under the earth's crust, from about 50 to about 250 Km



The rate of propagation of the two distinct groups was studied with the result that the first was propagated with a mean constant velocity of 8.0 Km/sec, the second with about 4.4 Km/sec. This was verified for many earthquakes.

It was then necessary to show that the waves, longitudinal and transversal, for some reason, were propagated in a zone whose upper limit was given by the earth's crust.

Given the depth of these earthquakes, during which the waves originate and which are propagated at great distances, the following explanation was formulated and first communicated in November 1953 to the Accademia Nazionale dei Lincei.

It is known from the research of Gutenberg, many times verified from 1927 until today, that there exists a thick zone under the earth's crust, where the velocity of propagation of the spatial seismic waves decreases slowly with depth, reaches a minimum at 80-100 Km, and then increases again at the same slow rate.

It is this zone, from about 40 Km to about 300 Km, to which is given the name «asthenosphere».

The origin of the observed phenomenon can be, without doubt, attributed to the velocity flexion.

It is clear, in fact, that a spherical stratum with a velocity flexion (that which the Americans call, with a rather unprecise locution, «a low velocity layer») is adapted to transmit seismic energy: it is sufficient that this energy be injected parallel to the limiting surfaces, or, at least, with an inclination such as to oblige it to reflect rythmically within the layer, for it to be transmitted at great distances.

This hypothesis can be verified in an indirect way.

It has been said that the more nearly parallel the energy wave, from the center of a quake in the asthenosphere, is propagated to the limiting surfaces, the more it will be concentrated in the asthenosphere. In the most favorable cases, there exists a solid angle, with its center at the focus of the earthquake, of such a size and direction that all of the seismic rays included by it are obliged to remain in the asthenosphere.

Thus, for certain earthquakes, having epicentral distances which vary between certain limits, there should be practically no registration of PP or PPP waves, while the  $P_n$  waves should appear particularly evident.

In other words, there can be epicentral distances which permit

*the asthenosphere to capture the greater part of the seismic energy which, under normal conditions, would have gone into the formation of PP and PPP waves. This energy is, instead, concentrated in the form of  $P_n$  waves.*

*Several particularly significant cases of this kind are reported on; in fact, in these cases, the reflected longitudinal waves show only weak traces, while the  $P_n$  waves are very evident. Analogous observations can be made for the  $S_n$  waves.*

*The asthenosphere, further, as is shown in this work, conducts also the Rayleigh waves ( $R_n$ ), which sensibly anticipate, according to the epicentral distance, the analogous waves of the earth's crust.*

#### BIBLIOGRAFIA

- (1) CALOI P., «Onde longitudinali e trasversali guidate dall'astenosfera». Rend. Acc. Naz. Lincei., Cl. sc. fis. mat. e nat., serie VIII, vol. XV (1953).