

# CONTRIBUTO ALLO STUDIO DELLA COSIDDETTA « FASE PRINCIPALE » DI UN SISMOGRAMMA

S. MENIS - C. MORELLI

1. *Premessa.* — È ben noto come quella che, per i terremoti a profondità normale, è generalmente la parte più vistosa del sismogramma — a partire dalla distanza di circa 300-500 km e con sismografi a periodo non eccessivamente breve —, rappresenti ancor oggi per la massima parte un problema insoluto in Sismologia, sia nei riguardi della genesi, che della propagazione e della natura fisica dell'oscillazione stessa.

Esiste bensì la teoria classica di Love, la quale dimostra la possibilità di esistenza di onde superficiali trasversali tangenziali: queste sono state chiaramente identificate con le onde superficiali a lungo periodo, prive di componente verticale (onde *L*), che il più delle volte precedono la fase massima dei sismogrammi.

Ma l'identificazione di questa fase massima con le onde previste dalla teoria, pure classica, di Rayleigh è tutt'altro che sicura. Infatti, questa teoria prevede un tipo di onde superficiali (onde *R*) a carattere sinusoidale con le seguenti caratteristiche:

1) Le onde *R* dovrebbero essere *polarizzate nel piano principale di propagazione*: invece, questa polarizzazione si riscontra solo raramente.

Ricordiamo a questo proposito le seguenti conclusioni cui è giunto Dinca-Samuracas (5):

*a*) Nella fase massima le vibrazioni ruotano attorno all'asse di propagazione, ed il fenomeno presenta un carattere più o meno marcato a seconda della stazione di registrazione.

*b*) Le vibrazioni polarizzate sono poco frequenti ed il fenomeno che corrisponde alla polarizzazione sembra essere influenzato da diversi fattori; tra questi, la posizione reciproca della zona epicentrale e dei luoghi di osservazione.

*c*) La polarizzazione delle onde si verifica in piani diversissimi che non sono mai legati nettamente alla posizione della Stazione. Il tragitto e la direzione di emergenza non hanno influenza sulla natura delle vibrazioni, ma solamente sulle intensità relative.

*d*) Non c'è alcuna relazione semplice tra l'ampiezza del movimento vero del suolo e la distanza epicentrale, mentre le condizioni locali e la posizione del luogo

d'osservazione in rapporto all'epicentro hanno un'influenza delle più marcate sul carattere del movimento; infine l'aspetto generale dei sismogrammi è, per una data stazione, caratteristica della regione epicentrale.

A conclusioni analoghe è giunto anche il Pannocchia (5):

e) La particella sollecitata da un'onda della fase massima oscilla in piani diversi, e la polarizzazione avviene soltanto per tratti brevissimi e appare del tutto accidentale.

f) Solo accidentalmente l'azimut del movimento in senso orizzontale coincide con quello di provenienza del moto.

g) Il senso della rotazione non è sempre lo stesso.

II) Inoltre, *le traiettorie delle particelle sollecitate dalle onde R dovrebbero essere ellissi, con lo spostamento verticale  $w$  maggiore di quello orizzontale  $u$ , in un rapporto costante*; qualora si assuma il valore di 0,25 per il coefficiente di Poisson  $\sigma$  degli strati superficiali attraversati, dovrebbe essere:  $w/u = 1,47$ .

Invece, molto spesso si riscontra sperimentalmente che l'anzidetta traiettoria non è ellittica, oppure che il rapporto  $w/u$  non è costante; ed in ogni caso esso non è che incidentalmente uguale al valore di 1,47 previsto dalla teoria. Anzi, come ha trovato il Giorgi (6), esso è spesso addirittura minore di 1.

Una spiegazione a questo fatto è stata, almeno in parte, offerta dal Sezawa (7), il quale, studiando il problema della dispersione delle onde elastiche in un mezzo stratificato, ha trovato che l'effetto degli strati superficiali sulla propagazione delle onde del tipo  $R$  è il seguente: se la lunghezza d'onda è molto piccola (o molto grande) rispetto allo spessore dello strato superficiale, il rapporto  $w/u$  per le onde  $R$  si approssima al valore 1,47 previsto dalla teoria; nei casi intermedi, in cui la lunghezza d'onda è comparabile allo spessore dello strato superficiale, sia la velocità di propagazione  $V_R$  che  $w/u$  ne sono sensibilmente influenzati. Conclusioni analoghe sono state ottenute da H. Jeffreys (8), che ha calcolato il rapporto  $w/u$  in funzione del rapporto fra lo spessore dello strato superficiale e la lunghezza d'onda, ed ha così ottenuto valori variabili fra 1,13 e 1,51.

Questo risultato è stato successivamente confermato, per il caso di un mezzo elastico firmo-viscoso stratificato, dal Caloi (9), il quale ha trovato che il rapporto  $w/u$  non è costante, ma è funzione della lunghezza d'onda; ed in altro lavoro (10) ha dimostrato che la firmo-elasticità determina una sensibile riduzione del rapporto  $w/u$ , fino a valori prossimi all'unità.

III) *La velocità di propagazione  $V_R$  delle onde R dovrebbe essere costante.*

Invece, la velocità apparente che si riscontra nelle onde della fase massima è variabile anzitutto col periodo; ed inoltre a seconda della direzione di provenienza, e soprattutto del tragitto percorso.

Ciò risulta chiaramente da una ricerca del Valle (11). Ricordiamo inoltre le seguenti conclusioni del Caloi (10):

*h)* Per tragitti continentali, la velocità di propagazione per le onde lunghe varia pressoché linearmente col periodo, crescendo col crescere di questo.

*i)* A parità di periodo inoltre risultano molto più veloci le onde superficiali con tragitto suboceanico, e la differenza aumenta poi per i tragitti subpacifici; ne segue una notevole complessità del problema delle determinazioni delle dromocrona delle onde superficiali.

Ma quest'ultimo fatto non può essere preso come prova contraria alla teoria di Rayleigh, perché variano le condizioni fisiche del mezzo in cui l'onda si propaga.

Quanto esposto ai punti I) e II) mostra chiaramente che l'identificazione delle onde costituenti la fase massima di un sismogramma con quelle previste dalla teoria di Rayleigh urta contro difficoltà difficilmente superabili.

Né questo vale solo per terremoti lontani, perché in un recente studio, Giorgi e Valle (<sup>10</sup>) si sono occupati della propagazione, dispersione e assorbimento delle onde massimali relative a terremoti di origine vicina, limitatamente ai dati che si riferivano ad un sisma avvenuto nell'Italia Centrale, ed hanno ottenuto gli stessi risultati; in particolare, anche per quanto riguarda il coefficiente di assorbimento delle onde sismiche superficiali, hanno confermato i risultati già ottenuti dal Valle (<sup>11</sup>).

Essi hanno ritrovato infatti che la velocità delle onde *M* varia a seconda dei tragitti percorsi; e che le onde *M* non hanno il carattere delle onde di Rayleigh in quanto oscillano generalmente in piani diversi da quello principale, ed anche ruotanti intorno alla direzione di propagazione. Inoltre, hanno confermato che:

*l)* il coefficiente d'assorbimento globale cresce con straordinaria rapidità al crescere della frequenza.

La teoria delle onde di Rayleigh è stata modificata recentemente dal Caloi (<sup>12</sup>), il quale ha applicato a queste onde le equazioni dei piccoli movimenti in un mezzo firno-elastico isotropo ed omogeneo (formule di Sezawa) ed ha dimostrato che l'attrito interno giustifica le caratteristiche osservate delle onde superficiali, che invece nella teoria di Rayleigh sono considerate come costituenti treni d'onda persistenti indefinitamente. La nuova teoria mostra al contrario che queste onde presentano un fattore di smorzamento molto forte per i piccoli periodi (confermando così pienamente quanto osservato da Valle, e da Giorgi e Valle; v. sopra, *l)* e che va gradualmente diminuendo con l'aumentare del periodo.

Altri sviluppi della teoria sulle onde superficiali sono dovuti a Uller ed a Jeans, ma la teoria più generale delle onde superficiali è dovuta al Somigliana (<sup>13</sup>). In questa teoria, le onde *R* figurano come

un caso particolare; difatti, essa dimostra l'esistenza in un suolo piano indefinito di due altri sistemi di onde piane, risultanti ciascuno dalla sovrapposizione di due sistemi di onde l'uno longitudinale, l'altro trasversale, aventi uguale velocità di propagazione superficiale. La vibrazione giace per entrambi nel piano di propagazione, e non è smorzata, come nelle onde di Rayleigh. Inoltre, soddisfano alla teoria stessa anche onde superficiali trasversali-tangenziali (v. (<sup>15</sup>), nota II), propagantisi con velocità uguale ad una qualunque delle coppie associate sopra menzionate.

Recentemente (1949) il Somigliana ha ripreso il problema delle onde sul suolo piano con procedimento più semplice. Ha così ritrovato che l'ipotesi di vibrazioni che avvengono nel piano di propagazione (comune alle onde di Rayleigh ed alle Sue) non è essenziale, essendo possibile sovrapporre alle onde solite, altre che sono *normali* al piano di propagazione (cortese comunicazione dell'A.).

Ma ritorneremo più ampiamente (§ 7) sulla teoria di Somigliana e sulla sua importanza per la spiegazione dei fatti osservati.

A conclusione di questa rapida rassegna sullo stato attuale del problema della cosiddetta « fase principale » di un sismogramma, possiamo dire che la teoria sulla natura fisica e propagazione di questo particolare tipo di onde sembra ormai abbastanza sviluppata, specie dopo le ricerche del Caloi e del Somigliana. E ciò nonostante le semplificazioni su cui quasi tutte queste teorie sono basate, di cui la principale è quella dell'assunzione di un mezzo piano, omogeneo, isotropo, illimitato; ma altre non meno importanti sono quelle per cui non si tiene conto della dispersione e dell'assorbimento.

Manca invece un accordo completo fra teoria e dati di osservazione: il presente studio si prefigge appunto di tentare di superare questo disaccordo.

2. *Impostazione della ricerca.* — L'osservazione fondamentale, da cui siamo stati mossi ad iniziare questa ricerca, è la seguente: l'aspetto della fase massima, costituita da treni d'onde sinusoidali smorzate, con periodo via via decrescente, fa sospettare chiaramente l'esistenza di *fenomeni interferenziali* fra onde di periodo diverso; ciò viene confermato anche da quanto ricordato nei punti *a)*, ..., *h)* precedenti. Ora, non potrebbe darsi che le onde elementari, di cui la fase massima è la risultante, soddisfacessero almeno esse, in tutto o in parte, alla teoria?

È chiaro che per dare una risposta a questa domanda è necessario anzitutto separare queste costituenti elementari, cioè fare l'analisi del sismogramma. Successivamente, ognuna di esse andrà studiata separatamente nelle sue caratteristiche fisiche.

Questo è appunto quanto abbiamo fatto, seguendo il procedimento e con i risultati che ora in dettaglio esporremo. Non sarà inutile però precisare ancora che l'oggetto di questa ricerca è la « natura fisica » dell'onda considerata, ed eventualmente la sua propagazione, ma non già la sua genesi.

Fra tutti i sismogrammi registrati a Trieste (dal 1931 al 1949) con chiari esempi di onde della fase massima, si sono anzitutto cercati quelli che presentavano registrazioni ampie e nitide sulle tre componenti dei Wiechert a registrazione meccanica, escludendo quindi i fotosismogrammi Allani per i quali qualche dubbio potrebbe sorgere sulla costanza del trascinamento magnetico. E diciamo subito che per « fase massima » di un sismogramma intendiamo quella a carattere sinusoidale con componente verticale, dato che è questa appunto normalmente la parte più vistosa del sismogramma; tali onde si indicano generalmente con la lettera *M*, e si sogliono identificare — impropriamente — con le onde di Rayleigh.

La parte precedente, quella delle onde *L*, è stata considerata solo secondariamente, in quanto per essa è già stato generalmente accertato l'accordo con le onde di Love.

Fra gli esempi con buone registrazioni sui Wiechert, sono stati prescelti per lo studio i due seguenti, con ipocentro a profondità normale:

I<sup>o</sup> - 18 novembre 1941.  $H = 16.46.22$ , dist. da Trieste: 9000 km  
Epicentro: 32° N 134° E, Giappone (Pasadena).

II<sup>o</sup> - 24 agosto 1942.  $H = 22.50.32$ , dist. da Trieste: 11.000 km  
Epicentro: 15° S 75° W, Perù meridionale (Pasadena).

Rispetto a Trieste, l'azimut del I<sup>o</sup> epicentro è di 45°, del secondo di 269°: condizioni queste favorevoli, in quanto le due componenti orizzontali Wiechert sono orientate a Trieste NW-SE e NE-SW: sicché nel I<sup>o</sup> caso il piano di propagazione coincide con la componente NE-SW, nel II<sup>o</sup> caso esso si trova angolarmente equidistante dalle due componenti, e quindi risultano prossimamente uguali le proiezioni su queste due componenti del moto nel piano di propagazione.

I due terremoti considerati hanno una notevole distanza epicentrale, cosa questa opportuna per ottenere registrazioni in cui la fase massima raggiunga notevole sviluppo. Si osserva difatti in ambedue

i casi che queste onde hanno ampiezze notevolissime, molto maggiori di quelle delle onde spaziali che le precedono.

La zona epicentrale nei due terremoti considerati è rispetto a Trieste in posizione tale che il cammino percorso dalle onde risulta abbastanza omogeneo. Difatti, per il terremoto giapponese le onde superficiali per giungere a Trieste hanno attraversato uno strato formato da materiale sialico lungo tutto il continente eurasiatico. Analogamente nel terremoto del Perù meridionale, le onde della fase massima per giungere a Trieste hanno attraversato l'Oceano Atlantico ed il continente europeo, e lo strato del materiale sialico, sebbene con spessore ridotto, è presente pure nell'Oceano Atlantico.

Si è cercato così di ridurre al minimo il verificarsi dei fenomeni secondari di riflessione e rifrazione dovuti all'incontro delle onde in esame con superfici di discontinuità. Ma non si può naturalmente evitare del tutto, specie se le onde arrivano da grandi distanze, come nei due casi considerati, l'incontro con superfici di discontinuità dovute alle diversità geologiche locali del sottosuolo: né l'influenza derivante alle onde massime dalle variazioni di spessore dello strato del Sial.

I sismogrammi, limitatamente agli intervalli considerati e che saranno più avanti specificati, sono stati ingranditi fotograficamente (componenti NW e NE, 5 volte; componente Z, 15 volte) e riportati sulla carta millimetrata. Questi ingrandimenti sono stati analizzati con l'analisi periodale del prof. Vercelli (<sup>1</sup>), applicando i seguenti schemi:

I' caso:

III,	4	per l'onda	2	(= 13 ÷ 21 sec)
III,	7	»	»	3 (= 18 ÷ 24 »)
III,	9	»	»	4 (= 26 ÷ 29 »)
III,	10	»	»	10-12 (= 39 »)

II' caso:

III,	11	per l'onda	5-6	(= 16 ÷ 21 sec)
IV,	4	»	»	3 (= 22 ÷ 26 »)
IV,	5	»	»	10-12 (= 32 ÷ 41 »)

Il residuo ottenuto in tutte le analisi è trascurabile e privo di elementi periodici, tale cioè che il risultato si può considerare sod-

disfacente: le componenti sinusoidali trovate esauriscono il sismogramma.

Dalle onde componenti ricavate si è risaliti ai moti reali del suolo ad esse corrispondenti. Ciò si è ottenuto mediante il calcolo dell'ingrandimento dinamico dello strumento in corrispondenza ai diversi periodi delle oscillazioni.

Per questo calcolo, si è tenuto conto delle seguenti costanti strumentali dei Wiechert all'epoca dei due terremoti studiati:

Componente	$V_0$	$T_0$ (sec)	$v$
NW-SE	212	5,5	5,1
NE-SW	216	5,4	5,0
Z	86	4,4	3,4

Non è stato invece tenuto conto del tempo di rilassamento  $\tau$ , poiché questo non porta alcuna modificazione apprezzabile data la piccolezza del periodo proprio strumentale. Infatti, ad esempio, per la componente NW-SE che delle tre componenti ha il periodo strumentale maggiore (5,5 sec), si avrebbe, per un'onda di periodo  $T = 25$  sec, il rapporto  $T/T_0 = 4,5$ ; per il valore dello smorzamento  $v = 5,1$ , si ottiene allora  $\tau/T = 0,035$ , cioè  $\tau = 0,70$  sec.

Nel seguito tutte le osservazioni sulle onde componenti si intenderanno riferite al moto vero del suolo.

3. *Studio della fase massima del terremoto giapponese del 18 novembre 1941.* — La parte di « fase principale » che si è presa in esame per questo terremoto incomincia 30 minuti dopo l'inizio della registrazione (16.59.00) e si estende per un intervallo di 18 minuti, in modo da comprendere gran parte del gruppo delle onde  $L$ , e alcuni dei primi, e nel contempo più sviluppati, treni d'onde della fase massima.

a) *Moto registrato.* Prima di passare all'analisi dei sismogrammi, si è effettuata una rappresentazione vettoriale del moto registrato, proiettato sul piano orizzontale: ne risulta un carattere nettamente e spiccatamente *trasversale* dal minuto 30 al minuto 34, con assenza di componente verticale: siamo quindi in presenza di onde  $L$ . Quando incomincia la componente verticale (min. 35), cioè quando, secondo la teoria, dovrebbero subentrare le onde  $R$ , la predominanza del moto trasversale permane, ma i vettori dell'oscillazione assumono anche direzioni comunque orientate: raramente però, e con ampiezze molto minori, nella direzione di provenienza.

La fig. 1 riporta la proiezione sul piano orizzontale del moto di una particella sollecitata dalle oscillazioni della fase massima, nell'intervallo di tempo dal minuto 41 al minuto 45 (v. tabella 1): come si vede, soltanto attorno al minuto 42 c'è qualche accenno ad oscillazioni longitudinali, ma per il resto esse sono spiccatamente trasversali. Ciò conferma quanto già noto: *la fase massima non si può individuare senz'altro con le onde previste dalla teoria di Rayleigh.*

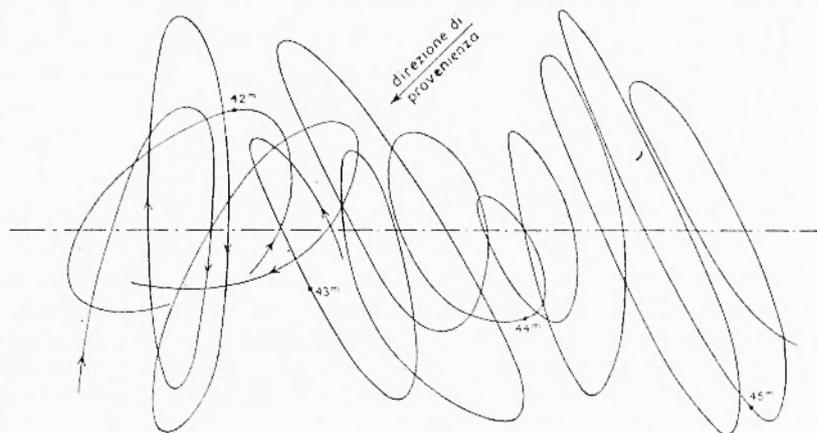


Fig. 1 - Proiezione orizzontale del moto in corrispondenza alla fase massima, per il terremoto giapponese del 18 novembre 1941

b) *Analisi del moto.* Abbiamo pensato — come si è detto — di ricercare se onde di tale specie si presentano almeno fra gli elementi semplici componenti; ed a questo fine abbiamo sottoposto le curve registrate all'analisi periodale. Questa ha scomposto l'onda complessa dei sismogrammi in quattro onde semplici, di cui quella a periodo maggiore ( $T = 39$  sec) compare solamente sulla componente NW all'inizio della parte di sismogramma considerato e per breve intervallo di tempo, pur raggiungendo ampiezze non trascurabili (fino ad un massimo di 370  $\mu$  per il moto reale del suolo); essa rappresenta perfettamente, per il suo carattere trasversale tangenziale, un'onda di Love che va estinguendosi al comparire delle onde massime (cioè all'inizio del 34° minuto, corrispondente ad un ritardo di 35 minuti rispetto all'inizio della registrazione). Dato questo suo carattere, l'onda non è stata compresa nella tabella che segue, in cui per semplicità abbiamo riportato in sintesi i risultati dell'analisi. Nella tabella il segno + indica movimento verso NW, verso SW e verso l'alto, rispettivamente.



Minuto	1ª Componente						2ª Componente						3ª Componente					
	Periodo(sec)		Ampiezza (μ)				Periodo(sec)		Ampiezza (μ)				Periodo(sec)		Ampiezza (μ)			
	NW	SW	Z	NW	SW	Z	NW	SW	Z	NW	SW	Z	NW	SW	Z	NW	SW	Z
37 <sup>m</sup>	20	27	+ 81			+ 200	20	24	+ 148	+ 40		17	14	+ 118			+ 44	
			- 155			- 192					- 148					- 118		
20	27		+ 178			+ 222	20	24	+ 165	+ 15		17	14	+ 125			+ 44	
			- 310			- 176					+ 192			+ 15		- 125		
20	27		+ 356			+ 207	20	24	+ 560	+ 44		17	14	+ 178			+ 44	
			- 326			- 193					+ 237			+ 15		- 178		
36 <sup>m</sup>	20	26	+ 252			+ 153	20	24	+ 381	+ 59		16	15	+ 207			+ 44	
			- 252			- 133					+ 379			+ 104		- 207		
—	26	—	—			—	20	24	+ 415	+ 89		16	15	+ 178			+ 44	
			—			- 178					+ 415			+ 89		- 178		
35 <sup>m</sup>	—	26	—			+ 133	20	24	+ 266	+ 89		16	15	+ 148			+ 44	
			—			- 207					+ 370			+ 89		- 148		
26	26	—	—			+ 247	23	24	+ 192	+ 103		16	15	+ 143			+ 44	
			—			- 320					+ 163			+ 74		- 143		
26	26	—	+ 170			+ 259	23	24	+ 207	—		16	15	+ 120			+ 74	
			- 222			+ 430*					+ 207			—		- 120		
26	26	—	+ 252			- 310	23	20	+ 474	+ 44	(- 590)	16	—	+ 252			+ 55	
			- 252			- 505*					+ 474			+ 44	(+ 490)	- 252		
40 <sup>m</sup>	26	26	+ 252			+ 250	23	20	+ 444	+ 103	(- 490)	16	15	+ 192			+ 72	
			- 222			+ 590*					+ 503			+ 126	(+ 785)	- 192		
26	26	—	+ 252			- 207	23	20	+ 503	+ 126	(+ 386)	16	15	+ 153			+ 60	
			- 222			- 565*					- 207			+ 148	(- 386)	- 153		
26	26	—	—			+ 200	20	(23)	+ 163	+ 133	(+ 490)	16	15	+ 222			+ 59	
			—			+ 645*					+ 266			+ 193	(+ 490)	- 222		
41 <sup>m</sup>	—	—	—			+ 400*	20	20	+ 510	+ 193	(+ 785)	16	15	+ 296			+ 62	
			—			+ 222*					+ 510			+ 193	(+ 785)	- 296		
26	—	—	—			+ 266	20	20	+ 430	+ 103	(+ 490)	16	15	+ 365			+ 74	
			—			+ 222*					+ 266			+ 297	(+ 490)	- 365		
42 <sup>m</sup>	26	—	—			+ 118	20	20	+ 266	+ 297	(+ 490)	16	15	+ 362			+ 133	
			—			- 207					+ 118			+ 296	(+ 490)	- 362		
26	—	—	+ 252			+ 104	20	20	+ 281	+ 281	(+ 490)	16	15	+ 185			+ 192	
			- 281			- 104					+ 104			+ 252	(+ 490)	- 185		
42 <sup>m</sup>	26	—	—			+ 148	20	20	+ 252	+ 252	(+ 490)	16	15	+ 118			+ 170	
			—			- 207					+ 118			+ 252	(+ 490)	- 118		
26	—	—	+ 252			+ 370	23	20	+ 252	+ 252	(+ 490)	16	15	+ 104			+ 176	
			- 163			- 192					+ 104			+ 153	(+ 490)	- 104		
26	—	—	—			+ 580	20	20	+ 580	+ 103	(+ 490)	16	15	+ 96			+ 176	
			—			+ 148					+ 96			+ 96	(+ 490)	- 96		
43 <sup>m</sup>	26	—	—			+ 482	23	—	—	—	(+ 490)	16	15	+ 80			+ 74	
			—			- 310					+ 80			+ 74	(+ 490)	- 80		
26	—	—	—			+ 118	23	—	—	—	(+ 490)	16	15	+ 59			+ 59	
			—			- 163					+ 59			+ 59	(+ 490)	- 59		
26	—	—	—			+ 59	20	—	—	—	(+ 490)	16	15	+ 91			+ 69	
			—			- 74					+ 91			+ 44	(+ 490)	- 91		
26	—	—	+ 104			+ 74	—	—	+ 74	+ 15	(+ 490)	16	15	+ 104			+ 59	
			- 117			- 67					+ 104			+ 37	(+ 490)	- 104		
44 <sup>m</sup>	26	—	+ 148			+ 74	20	—	+ 74	+ 15	(+ 490)	16	15	+ 207			+ 82	
			- 117			- 89					+ 207			+ 15	(+ 490)	- 207		
26	—	—	—			+ 192	18	20	+ 192	+ 30	(+ 490)	16	15	+ 192			+ 116	
			—			+ 148					+ 192			+ 30	(+ 490)	- 192		
44 <sup>m</sup>	26	—	+ 103			+ 133	18	20	+ 148	+ 15	(+ 490)	16	15	+ 153			+ 133	
			- 70			- 133					+ 153			+ 59	(+ 490)	- 153		
45 <sup>m</sup>	—	—	—			+ 89	18	—	—	—	(+ 490)	16	15	+ 148			+ 74	
			—			- 74					+ 148			+ 44	(+ 490)	- 148		
26	—	—	+ 30			+ 89	18	—	—	—	(+ 490)	16	15	+ 104			+ 60	
			- 74			- 59					+ 104			+ 20	(+ 490)	- 104		
46 <sup>m</sup>	26	—	+ 148			+ 74	18	—	—	—	(+ 490)	16	15	+ 148			+ 59	
			- 148			- 74					+ 148			+ 30	(+ 490)	- 148		
26	—	—	—			+ 74	18	—	—	—	(+ 490)	16	15	+ 152			+ 65	
			—			- 49					+ 152			+ 44	(+ 490)	- 152		
46 <sup>m</sup>	26	—	+ 163			+ 59	8	—	—	—	(+ 490)	16	15	+ 163			+ 65	
			- 178			- 74					+ 163			+ 29	(+ 490)	- 163		
26	—	—	—			+ 30	18	—	—	—	(+ 490)	16	15	+ 222			+ 59	
			—			- 148					+ 222			+ 59	(+ 490)	- 222		
47 <sup>m</sup>	26	—	+ 148			+ 59	18	—	—	—	(+ 490)	16	15	+ 257			+ 50	
			- 148			- 59					+ 257			+ 74	(+ 490)	- 257		
26	—	—	—			+ 104	18	—	—	—	(+ 490)	16	15	+ 165			+ 50	
			—			- 104					+ 165			+ 59	(+ 490)	- 165		
26	—	—	+ 44			—	18	—	—	—	(+ 490)	16	15	+ 118			+ 69	
			- 44			—					+ 118			+ 59	(+ 490)	- 118		

Dalla tabella si vede anzitutto come due delle componenti, precisamente quella a periodo più piccolo e quella a periodo maggiore, si trovino già esistenti, all'inizio della parte considerata, mentre la componente a periodo intermedio incomincia con ritardo di circa due minuti rispetto alle altre due.

Caratteristica generale di tutte tre le onde è il loro maggiore sviluppo sulla componente NW rispetto a quella NE, corrispondentemente al loro carattere predominante di trasversalità; tutte tre inoltre presentano ben chiaro l'andamento a treni d'onde, e con più evidenza sulla componente NW.

Le esamineremo ora più in dettaglio separatamente.

*1<sup>a</sup> Componente* ( $T$  mass. = 29 sec,  $T$  min. = 26 sec).

Caratteristica di questa componente è la mancanza dell'onda corrispondente nella direzione SW-NE per tutto l'intervallo preso in esame, mentre sulla componente NW-SE l'ampiezza dell'onda è piuttosto notevole: essa quindi, durante tutto l'intervallo considerato, rimane rigorosamente *a carattere trasversale*, e si presenta con treni di molte oscillazioni, intervallati da tratti più o meno lunghi in cui l'onda si annulla.

Le oscillazioni sulla componente verticale, per quest'onda, hanno inizio al minuto 31"; fino a questo punto essa è sempre quindi un'onda di Love. Le oscillazioni sulla componente verticale sono regolari ed abbastanza ampie (fino ad un massimo di 320  $\mu$ ). Su questa componente l'onda non rimane però fino alla fine, ma si interrompe al minuto 41, per modo che dall'onda a componente verticale riaffiorano delle oscillazioni tangenziali trasversali, cioè riappare un'onda di Love.

*2<sup>a</sup> Componente* ( $T$  mass. = 24 sec,  $T$  min. = 18 sec).

Inizia al minuto 32' raggiungendo subito un'ampiezza notevole sulla componente NW. Il periodo delle due componenti non si mantiene sempre uguale: dopo un tratto di annullamento (minuto 35") si raggiungono differenze, per alcuni tratti, di 4 sec.

L'onda è molto sviluppata, particolarmente sulla componente NW (ampiezza massima 885  $\mu$ ). Perciò il moto è in prevalenza trasversale, ad eccezione del breve tratto (minuti 34-35) in cui l'onda non compare sulla componente NW e per cui lo spostamento è di conseguenza nella direzione di provenienza. Questo carattere di trasversalità è però a tratti meno spiccato fra i minuti 38 e 43.

In quanto alle oscillazioni sulla componente verticale, queste compaiono limitatamente a quattro oscillazioni complete per le quali non si può vedere alcun legame di continuità con le componenti verticali delle altre onde. Nella tabella esse sono messe tra parentesi, nei minuti 39-40. Una revisione dell'analisi periodale ha consentito di assorbire queste oscillazioni nella componente verticale a periodo maggiore, corrispondente allo stesso intervallo di tempo, alla quale sono state aumentate in corrispondenza le ampiezze. Nella Tabella, i valori delle ampiezze

dell'onda con  $T = 26$  sec che corrispondono a tale correzione, sono segnati mediante un asterisco.

Risulta dunque che questa seconda componente è persistentemente *tangenziale* e principalmente *trasversale*. Se ne conclude che nella fase massima di questo terremoto è *sempre presente un'onda del tipo di Love*, almeno fino al punto considerato, che però è abbastanza inoltrato spingendosi a ben 48 minuti dopo l'inizio della registrazione.

Semberebbe così confermata l'ipotesi avanzata dal Wiechert per spiegare la diversità del valore osservato per il rapporto  $w/u$  rispetto a quello di 1,47 (per  $\sigma = 0,25$ ) previsto dalla teoria: le onde massime del sismogramma non sarebbero solamente onde del tipo Rayleigh, ma in esse sarebbero presenti anche onde a carattere tangenziale, tali da aumentare lo spostamento orizzontale e quindi da diminuire il valore del predetto rapporto.

### 3<sup>a</sup> Componente ( $T$ mass. = 16 sec, $T$ min. = 13 sec).

Nel punto in cui si è iniziata l'analisi del sismogramma, si è trovato che questa componente già esisteva sulla sola componente NW, con carattere quindi essenzialmente trasversale tangenziale e con ampiezze estremamente piccole; ciò per la durata di circa 4 minuti, dopo di che l'onda si annulla, per comparire poi con oscillazioni anche sulla componente SW con periodo di 15 sec, mentre sulla NW il periodo rimane immutato di 16 sec; le ampiezze sono notevolmente diverse dato che sulla componente NW l'ampiezza è andata rapidamente aumentando.

Perciò anche l'onda considerata presenta un carattere di spiccata trasversalità, per cui essa pure deve intendersi come un'onda di Love.

Solamente verso il minuto 38, l'onda cessa dal suo carattere tangenziale con l'inizio di oscillazioni anche sulla componente verticale; queste si mantengono per un buon tratto deboli, di ampiezza comparabile con quella della componente SW: il loro periodo varia da 14 a 15, e da 15 a 13 sec, mentre delle componenti orizzontali la NW mantiene costantemente il periodo di 16 sec, e da SW di 15 sec. Ne risulta una variazione continua della differenza di fase per le tre componenti.

Di esse la più interessante è di gran lunga la componente NW in cui risulta molto chiaro l'andamento a treni d'onda, i quali però non sono regolarmente decrescenti nelle ampiezze massime che raggiungono. I primi treni d'onde sono separati tra loro da brevi intervalli in cui l'onda risulta mancante, mentre i gruppi successivi sono collegati fra loro da vibrazioni non molto ampie e poco smorzate che distanziano notevolmente i singoli gruppi.

c) *Oscillazioni del suolo*. Per esaminare la natura fisica del moto delle singole componenti, ne è stata costruita la proiezione sul piano orizzontale e in quello verticale.

Per la 1<sup>a</sup> e 3<sup>a</sup> componente, limitatamente ad alcuni dei primi treni d'onda, la rappresentazione sul piano orizzontale ha dato tutta una serie di figure di Lissayous, che non sempre possono rappresentare schematicamente delle ellissi. Gli assi di queste figure presen-

tano delle rotazioni che per un buon tratto avvengono nello stesso verso. Negli intervalli tra i diversi treni d'onda le figure sono del tutto irregolari, e la costanza nel verso di rotazione viene a mancare. Riportiamo nella fig. 2 un esempio di tali ellissi per la 3<sup>a</sup> compo-

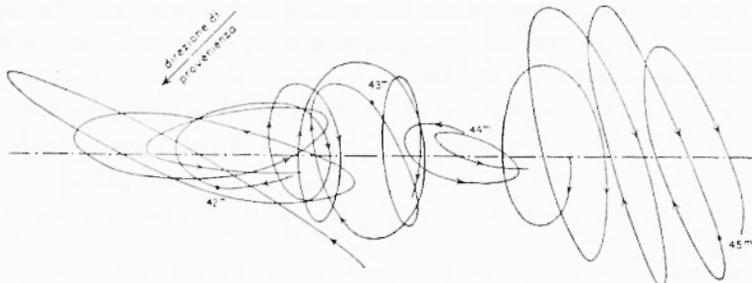


Fig. 2 - Proiezione orizzontale del moto dovuto alla 3<sup>a</sup> componente (in corrispondenza all'intervallo della fig. 1)

nente, dal minuto 41 al minuto 45, dove quindi già è spiccata la componente verticale: come si vede, permane ancora il carattere di prevalente trasversalità.

Per ottenere una rappresentazione dell'andamento del moto nello spazio, è stata rappresentata la sua proiezione sul piano verticale e su quello principale, per lo stesso intervallo di tempo sopra considerato. Anche qui sono state prese in esame solamente le onde componenti 1<sup>a</sup> e 3<sup>a</sup>, data la probabile completa mancanza di componente verticale per l'onda 2<sup>a</sup>.

Ne sono risultate delle ellissi, che si presentano a forma generalmente molto allungata (particolarmente nella 3<sup>a</sup> componente) e con l'asse maggiore diversamente inclinato sulla verticale, per modo che il rapporto tra spostamento verticale e orizzontale è variabile; inoltre

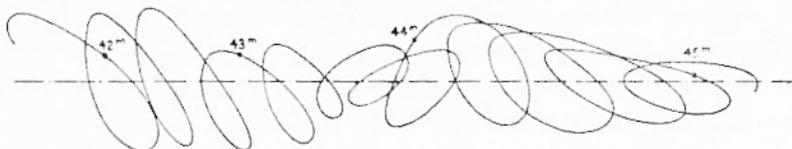


Fig. 3 - Moto nel piano verticale dovuto alla 3<sup>a</sup> componente (in corrispondenza all'intervallo della fig. 1)

il verso di rotazione degli assi delle ellissi non è sempre lo stesso. La fig. 3 riporta un esempio di tali ellissi sul piano verticale per la 3<sup>a</sup> componente, sempre nello stesso intervallo di tempo dianzi considerato. È da tener presente però che il piano stesso è variabile spesso

da ellisse ad ellisse, e che solo per comodità di disegno esse sono riportate tutte nello stesso piano.

Invece la proiezione di tutte queste ellissi sul piano principale è riportata nella fig. 4.

Per le quattro ellissi considerate della 1<sup>a</sup> componente, il rapporto  $w/u$  risulta avere un valore medio uguale a 1,03, minore cioè di quello previsto dalla teoria di Rayleigh.

Per la 3<sup>a</sup> componente si ottengono in corrispondenza delle ellissi considerate nelle precedenti figure i seguenti valori per il rapporto  $w/u$ :

0,78, 0,81 1,28 1,46 0,90 1,00 1,04 1,12 0,68 0,50 0,30

da cui risulta un valore medio per  $w/u$  di appena 0,90, dovuto alla forma allungata delle ellissi ed alla notevole inclinazione degli assi maggiori rispetto alla verticale.



Fig. 4 - Proiezione sul piano principale dello stesso moto di cui alla fig. 3

Per questo stesso primo motivo, i valori del rapporto  $a/b$  fra asse maggiore ed asse minore delle ellissi sono in corrispondenza:

2,76 3,50 5,00 6,20 3,28 3,60 1,55 2,00 1,71 2,28 3,08 5,83 3,00

da cui risulta un valore medio per  $a/b$  di 3,37.

Si conclude che anche per le componenti elementari il moto delle particelle ha carattere ellittico, e ciò in accordo con la teoria; ma questa cade in difetto per ciò che riguarda la direzione degli assi delle figure, sia nel piano orizzontale che in quello verticale.

4. Studio della fase massima del terremoto peruviano del 24 agosto 1942. — L'intervallo di tempo preso in esame sui sismogrammi si estende questa volta per 22 minuti, a partire dal 31esimo dall'inizio della registrazione (23.04.12): vi sono comprese inizialmente ancora

delle onde  $I_1$ , cui fanno seguito (a partire dal minuto 43) alcuni dei primi treni d'onda del gruppo della fase massima.

a) *Moto registrato*. Riportatane la proiezione sul piano orizzontale, è risultato anche qui che lo spostamento ha dapprima carattere predominante trasversale, ma questa volta non esattamente ortogonale alla direzione di provenienza; successivamente (dal minuto 43) la direzione di oscillazione varia in maniera irregolare, ma conserva ancora in prevalenza il carattere trasversale e non coincide che incidentalmente con la direzione di provenienza (fig. 5). Viene a mancare così una delle condizioni essenziali per poter identificare nelle onde della fase massima le onde previste dalla teoria di Rayleigh.



Fig. 5 - Proiezione orizzontale del moto in corrispondenza alla fase massima (ed alla 3ª componente), per il terremoto peruviano del 24 agosto 1942

h) *Analisi del moto*. I risultati dell'analisi, riferiti al moto vero del suolo, sono riportati in sintesi nella seguente tabella II.

Come si vede dalla tabella, la curva registrata è composta da tre onde sinusoidali pure, di cui la 2ª e la 3ª iniziano a distanza di circa un minuto l'una dall'altra, mentre quella a periodo maggiore si trova già esistente. Ognuna di esse ha periodo gradualmente decrescente, in accordo con la teoria, che prevede per le onde superficiali la dispersione normale, cioè velocità crescente al crescere del periodo dell'onda. Caratteristica comune alle tre onde componenti è quella di presentare ampiezze nettamente maggiori sulla componente NW-SE in confronto a quelle sulle NE-SW.

Passiamo ora a descriverle separatamente.

*1ª Componente* ( $T$  mass. = 41 sec,  $T$  min. = 32 sec).

Delle tre componenti, la prima a comparire è quella a periodo maggiore. Essa inizia con oscillazioni polarizzate nella direzione NW-SE. Presto si nota pure una componente oscillante in direzione NE-SW, con ampiezze non molto grandi e con periodo leggermente diverso da quello sulla componente NW, ciò che porta ad una variazione continua nello sfasamento delle due componenti. Contemporaneamente sulla NW le ampiezze raggiungono i loro valori maggiori, fino ad un massimo



Minuto	1ª Componente						2ª Componente						3ª Componente								
	Periodo(sec)			Ampiezza (μ)			Periodo(sec)			Ampiezza (μ)			Periodo(sec)			Ampiezza (μ)					
	NW/SW	Z		NW	SW	Z	NW/SW	Z		NW	SW	Z	NW/SW	Z		NW	SW	Z			
45 <sup>m</sup>							25	26	26	+ 351	+ 142	+ 500									
										- 247	- 161	- 550									
							23	26	26	+ 342	+ 171	+ 513	21						+ 66		
46 <sup>m</sup>										- 268	- 152	- 532	21						+ 171		
							23	26	22	+ 342	+ 171	+ 530	21	21					- 228		
										- 247	- 152	- 400	21	21	21				+ 304		-
47 <sup>m</sup>							21	26	22	+ 325	+ 171	+ 400							+ 360		- 171
										- 258	- 161	- 592	21						+ 380		+ 209
							23	24	22	+ 228	+ 142	+ 380	21	21					- 400		- 160
48 <sup>m</sup>										- 228	- 155	- 552	21	21	21				+ 360		+ 190
							23	24	22	+ 152	+ 133	+ 275							- 285		- 228
										- 153	- 122	- 228	21	21	21				+ 323	+ 47	+ 285
49 <sup>m</sup>										+ 190		+ 190	21	21	21				- 342	- 76	- 304
										- 190		- 190	21	21	21				+ 323	+ 76	+ 323
										+ 247		+ 171	21	21	21				- 266	- 76	- 304
50 <sup>m</sup>										- 228		- 171	21	21	21				+ 228	+ 66	+ 323
										+ 247		+ 152							- 342	- 76	- 305
										- 190		- 133	21	21	21				+ 455	+ 76	+ 366
51 <sup>m</sup>										+ 171									- 475	- 85	- 361
										- 152			20	21	19				+ 475	+ 76	+ 418
										+ 142			20	19	19				- 475	- 76	- 512
52 <sup>m</sup>										- 133			20	19	19				+ 475	+ 114	+ 436
										+ 153									- 436	- 114	- 512
										- 144			20	19	19				+ 398	+ 142	+ 531
53 <sup>m</sup>										+ 95									- 322	- 152	- 590
										- 95			20	19	19				+ 304	+ 171	+ 550
										+ 76									- 304	- 171	- 530
54 <sup>m</sup>										- 57			20	19	19				+ 304	+ 171	+ 608
										+ 47									- 322	- 190	- 512
										- 38			20	19	19				+ 342	+ 171	+ 590
55 <sup>m</sup>													18	19	19				+ 323	+ 171	+ 531
										- 360									- 209	- 171	- 493
										- 209			18	19	19				+ 95	+ 152	+ 475
56 <sup>m</sup>										- 95									- 95	- 171	- 493
										- 190			18	19	19				+ 95	+ 133	+ 418
										- 114									- 190	- 114	- 380
57 <sup>m</sup>										- 285			18	19	19				+ 209	+ 114	+ 504
										- 86									- 285	- 86	- 247
										- 342			18	19	19				+ 285	+ 86	+ 256
58 <sup>m</sup>										- 57			18	21	19				+ 370	+ 57	+ 162
										- 399									- 399	- 47	- 160
										- 370			16	21	19				+ 455	+ 38	+ 135
59 <sup>m</sup>										- 57									- 370	- 57	- 114
										- 325			16	19	19				+ 325	+ 95	+ 144
										- 228									- 228	- 76	- 133
60 <sup>m</sup>										- 209			16	19	19				+ 209	+ 85	+ 190
										- 228									- 228	- 76	- 228
										- 266			16	19	19				+ 266	+ 76	+ 304
61 <sup>m</sup>										- 266									- 266	- 57	- 104
										- 304			16	16	19				+ 304	+ 38	+ 142
										- 228									- 228	- 42	- 142
62 <sup>m</sup>										- 228			16	16	19				+ 228	+ 57	+ 361
										- 171									- 171	- 57	- 104
										- 171			16	16	19				+ 171	+ 42	+ 285
63 <sup>m</sup>										- 76									- 76	- 47	- 266
										- 7			16	16	19				+ 76	+ 47	+ 247
										- 9			16	16	16				+ 9	+ 57	+ 140
64 <sup>m</sup>										- 17									- 17	- 57	- 57
										+ 76			16	16	16				+ 76	- 57	+ 57
										- 76									- 76	- 57	+ 66
65 <sup>m</sup>										+ 133			16	16	16				+ 133	+ 61	+ 95
										- 114									- 114	- 57	- 115
										- 95			16	16	16				+ 154	+ 57	+ 133
66 <sup>m</sup>										- 95									- 95	- 48	- 133
										- 209			16	16	16				+ 209	+ 38	+ 114
										- 228									- 228	- 85	- 133
67 <sup>m</sup>										- 228			16	16	16				+ 228	+ 57	+ 16
										- 276									- 276	- 40	- 80
										- 370			16	16	16				+ 370	+ 38	+ 95
68 <sup>m</sup>										- 452									- 452	- 38	- 76
										- 266			16	16	16				+ 266	+ 47	+ 97
										- 209									- 209	- 19	- 76

di 655  $\mu$ . Dalla rappresentazione vettoriale si osserva che le vibrazioni avvengono costantemente lungo la stessa direzione, di poco diversa da quella delle oscillazioni iniziali di direzione NW-SE (fig. 6).

Si hanno quindi onde a periodo lungo, trasversali, senza componente verticale; esse cioè rappresentano le onde previste dalla teoria di Love.

Circa al minuto 40, l'onda inizia ad oscillare pure nella componente verticale. L'esistenza della componente verticale non è però molto sicura, in quanto essa non ha un carattere del tutto regolare mentre l'ampiezza (di registrazione) è piuttosto esigua. Ad ogni modo, è a questo punto che si potrebbe di conseguenza pensare che inizino le onde superficiali della fase massima.

L'ampiezza sulla comp. verticale è comparabile con quella sulla comp. NW-SE. Lo spostamento orizzontale risulta però ancora polarizzato normalmente al piano principale: e ciò in disaccordo con la teoria di Rayleigh.

L'onda ha termine dopo poche oscillazioni complete dall'inizio della componente verticale.

### 2<sup>a</sup> Componente ( $T$ mass. = 29 sec, $T$ min. = 22 sec).

Ha inizio circa 32 minuti dopo l'inizio del sismogramma, ed oscilla dapprima nella sola direzione NW-SE, per assumere dopo due oscillazioni complete anche una componente in direzione NE-SW.

Analogamente a quanto osservato per la prima componente, l'ampiezza maggiore si ha nella direzione NW-SE, e la direzione di oscillazione subisce lievi variazioni restando sempre pressoché normale al piano principale. Perciò anche le prime oscillazioni di questa 2<sup>a</sup> componente costituiscono ancora onde di Love.

Quasi contemporaneamente alla fine della 1<sup>a</sup> componente, compare per questa 2<sup>a</sup> la componente verticale, con periodo (27 sec) intermedio tra quello sulla NW-SE (25 sec) e quello sulla NE-SW (29 sec). L'onda perde allora il suo carattere tangenziale; e si potrebbe considerare quale continuazione dell'onda 1<sup>a</sup>, a periodo maggiore. La divisione in due parti è dovuta alla diversità del periodo, che da un valore di 32 sec passa a quello di 29 sec, ed al fatto che l'analisi periodale separa le singole componenti a seconda del periodo.

Le ampiezze raggiunte sulla componente verticale per questa 2<sup>a</sup> componente sono maggiori di quelle ottenute in corrispondenza sulle componenti orizzontali, ed arrivano ad un valore massimo di 530  $\mu$ . I vettori rappresentanti la componente orizzontale del moto si presentano a tratti, per più oscillazioni complete successive, nettamente polarizzati; le direzioni di polarizzazione differiscono anche sensibilmente dalla normale alla direzione di provenienza, ma mai, neppure per intervalli brevissimi, vanno a coincidere con questa.

L'onda continua con comp. verticale per poche oscillazioni complete, ed ha termine nel seguente ordine: prima sulla componente NE, poi sulla verticale, ed infine sulla NW.

### 3<sup>a</sup> Componente ( $T$ mass. = 21 sec, $T$ min. = 16 sec).

Inizia con un certo ritardo rispetto alle altre due, e presenta inizialmente delle oscillazioni sulla sola componente NW, poco rilevanti e intermittenti; per la mancanza di oscillazioni corrispondenti sulla componente verticale, l'onda ha carattere tangenziale trasversale; anche questa componente inizia quindi come onda di Love.



Come si vede, esso risulta da una successione di ellissi, abbastanza bene definite tranne che nei tratti di raccordo fra i singoli treni d'onde. Per ogni treno d'onda si nota una lenta rotazione dell'asse maggiore di queste ellissi. La direzione preminente è in questo caso obliqua, inclinata di circa  $45^\circ$  sulla direzione di provenienza.

La proiezione nel piano verticale di ogni ellisse del moto di una particella sollecitata dalla predetta componente è invece riportata nella fig. 6. Vale anche qui l'osservazione che i piani verticali di proiezione sono variabili, e che solo per comodità di disegno essi sono stati riportati tutti nello stesso piano. La proiezione sul piano principale delle stesse traiettorie è invece riportata nella fig. 7.

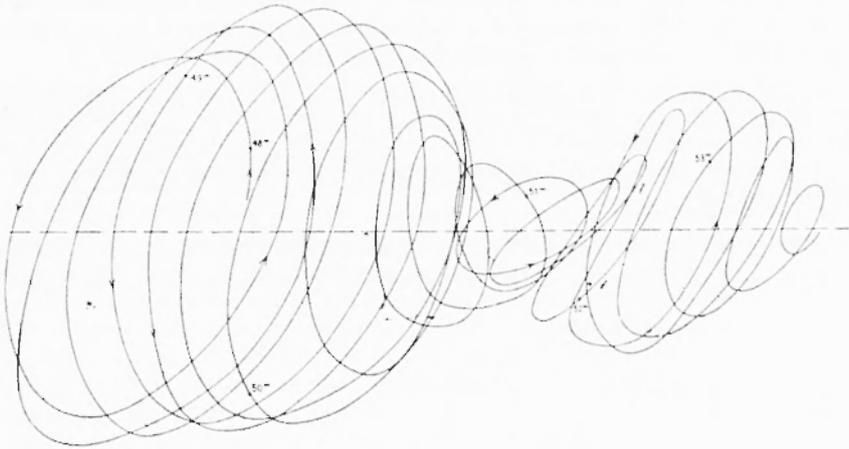


Fig. 7 - Proiezione sul piano principale dello stesso moto di cui alla fig. 6

Anche ora il moto è ellittico, e l'angolo che l'asse maggiore di queste ellissi forma con la verticale va continuamente variando. Per esempio, per il primo treno d'onda considerato, esso diminuisce fino a raggiungere un valore minimo, in corrispondenza della massima ampiezza delle onde nel gruppo. Successivamente l'angolo (acuto) sopraddetto aumenta, continuando la rotazione dell'asse maggiore sempre nello stesso senso. Poi torna a diminuire, si annulla, e di nuovo aumenta fortemente fino a diventare quasi retto.

Ne deriva anche qui che *il valore del rapporto  $w/u$  varia continuamente*; per il primo treno d'onda ora considerato esso assume infatti i seguenti valori:

1,00   1,22   1,39   1,81   1,70   1,56   1,37

con un valore medio di 1,43, in buon accordo quindi col valore 1,47 previsto dalla teoria di Rayleigh.

Considerando poi il rapporto  $a/b$  tra l'asse maggiore e l'asse minore, esso non rimane costante per tutte le ellissi, essendo queste più o meno allungate. Questo rapporto inoltre non è uguale al rapporto  $w/u$ , non coincidendo l'asse maggiore con la direzione verticale. Per il primo treno d'onde sopra considerato, i valori di  $a/b$  sono i seguenti:

1,26 1,26 1,43 1,83 1,80 1,56 1,38

con un valore medio di 1,50.

Nel secondo treno d'onde l'angolo che l'asse maggiore delle ellissi forma con la verticale è molto più accentuato: all'inizio l'asse maggiore è addirittura quasi orizzontale (fig. 6). Inoltre la sua rotazione non avviene per tutto il gruppo d'onde nello stesso verso, ma raggiunta una posizione di minima inclinazione rispetto alla verticale, la rotazione si inverte. Per questo secondo treno d'onde i valori del rapporto  $w/u$ , a causa della maggiore inclinazione delle ellissi, sono molto piccoli:

0,40 0,36 0,44 1,29 1,33 1,17 1,12 1,18.

con un valore medio di appena 0,91.

In corrispondenza il rapporto  $a/b$  è:

2,52 3,00 3,91 2,60 1,91 2,08 2,06 3,00

con un valore medio di 2,63.

Anche in questo caso quindi vengono bensì descritte delle ellissi, come richiesto dalla teoria di Rayleigh, ma non è in accordo con la teoria la continua rotazione dei loro assi.

5. *Conclusioni sperimentali.* — Confrontando i risultati ottenuti per i due terremoti studiati, si vede che l'analisi porta alla scomposizione dell'onda sismica della fase massima in tre componenti (la 4<sup>a</sup> componente che risulta per il terremoto giapponese non fa parte della fase massima).

Per il terremoto del Perù le tre componenti hanno dapprima carattere tangenziale trasversale, cioè sono onde di Love. Esse non perdono poi contemporaneamente il carattere tangenziale, ma successivamente, per le componenti a periodo minore in corrispondenza della fine dell'onda a periodo maggiore. Si vede quindi che le tre componenti sono l'una la continuazione dell'altra, e che perciò la fase mas-

sima di questo sismogramma si può considerare costituita da un'unica onda che inizialmente compare sovrapposta alle onde terminali del gruppo delle onde di Love.

Quest'onda presenta una diminuzione sensibile del periodo col procedere della registrazione (da 35 a 16 sec), cioè siamo in presenza di dispersione normale. Il suo periodo è inoltre sempre maggiore di quello corrispondente per il terremoto giapponese, in accordo col fatto che la distanza epicentrale è maggiore.

Nel terremoto del Giappone l'andamento è più complesso. Delle tre onde componenti, la 2<sup>a</sup> è costantemente, nell'intervallo di registrazione considerato, tangenziale e generalmente trasversale: essa rappresenta quindi un'onda di Love che viene a sovrapporsi alle onde a componente verticale proprie della fase massima. La 1<sup>a</sup> componente ha carattere rigorosamente trasversale ed è composta presumibilmente da due onde con periodi molto prossimi, di cui una a carattere tangenziale trasversale che continua anche quando l'altra, trasversale con componente verticale, cessa di essere registrata. Anche la 3<sup>a</sup> componente ha carattere prevalentemente trasversale, pur essendo dotata di una spiccata componente verticale.

In questo terremoto le tre onde componenti presentano, particolarmente sulla componente SW, un andamento intermittente a treni d'onde: i singoli treni sono separati, perché ogni componente si annulla anche per parecchi periodi. Nel terremoto del Perù invece le onde, pur variando di ampiezza anche notevolmente, presentano un andamento generalmente continuo.

La causa di questa differenza si deve ricercare probabilmente nella diversità del tragitto percorso. Difatti nel considerare questa differenza, come del resto nel considerare l'estinzione delle onde elementari costituenti, bisogna tener conto che essa può dipendere dalla differenza di vari fattori, lungo il tragitto: oltre all'assorbimento, essi sono: l'attrito interno molecolare, la variazione di forma dell'onda per dispersione, e la dispersione di energia per incontro con superfici di discontinuità molto inclinate.

Da ambedue i sismogrammi considerati risulta infine che il moto di una particella investita da un'onda della fase massima non avviene sempre nello stesso piano. La proiezione orizzontale della risultante del moto si sposta attorno alla direzione trasversale, scostandosi generalmente di poco da questa; il coincidere dell'azimut del movimento orizzontale con quello di provenienza è del tutto accidentale e di brevissima durata.

Non volendo generalizzare questi risultati dai soli due casi considerati, abbiamo esteso la ricerca anche ad altri terremoti; e precisamente a quelli indicati nella tabella III, scelti con il criterio che l'azimut del loro epicentro rispetto a Trieste fosse di  $45^\circ + k \cdot 90^\circ$  ( $k = 0, 1, 2, 3$ ) quando si consideravano le componenti a registrazione meccanica, in modo che una di queste due componenti orizzontali si trovasse sempre nella direzione di provenienza; e di  $0^\circ + k \cdot 90^\circ$  ( $k = 0, 1, 2, 3$ ) quando erano disponibili entrambe le componenti orizzontali a registrazione fotografica (orientate: N-S e E-W).

Come si vede dall'esame della tabella III, in tutti i 35 casi considerati, per distanze epicentrali da 1000 a 15.500 km e con azimut comunque orientati, risulta che nella fase massima di un terremoto, anche quando essa ha una spiccata componente verticale, sono presenti notevoli oscillazioni trasversali, che il più delle volte predominano. Ciò conferma pienamente i risultati generali sopra ottenuti.

6. *Confronto con la teoria.* — Abbiamo visto che il carattere predominante per le onde della fase massima è quello trasversale: ciò è in evidente contrasto con la teoria di Rayleigh, che prevede per esse il carattere longitudinale. Nel piano verticale poi le particelle sotto l'impulso delle onde massime descrivono bensì delle ellissi, come vuole la teoria di Rayleigh, ma queste hanno l'asse maggiore disposto secondo direzioni variabili, che generalmente non coincidono con la verticale. Il rapporto infine tra spostamento verticale e orizzontale non è costante.

Alle stesse conclusioni si giunge anche per le onde elementari che compongono la fase massima.

Si vede così che non solo le onde superficiali della fase massima di un sismogramma non si possono identificare con le onde previste dalla teoria di Rayleigh, ma che le stesse difficoltà si hanno anche quando si prendono in esame le singole componenti sinusoidali elementari dell'onda sismica: le onde di Rayleigh *pure* (isolate) quindi non sembrano trovarsi presenti nella fase massima dei sismogrammi neppure come onde componenti.

La teoria di Rayleigh risulta perciò insufficiente a spiegare la fase massima di un sismogramma.

Meglio risponde invece a questo scopo la teoria di Somigliana. Essa infatti consente di dare una spiegazione al fatto delle onde superficiali trasversali associate alle onde *R*: abbiamo visto nel § 1 che essa ammette, oltre alle onde *R*, altri due sistemi di onde superficiali

TABELLA III: Altri terremoti di cui si è studiata la fase massima

Distanza da Trieste (km)	Azimut $\theta$	Data	Regione	Coordinate	H (hh.mm.ss.)	Determ. da	Osservazioni
1.020	145	7. 7.47	Cefalonia	38N 20E	22.35.50	BCIS	Notev. comp. trasver.
1.050	147	1. 6.47	Jonio	36N 22E	11.18.32	BCIS	Notev.ma comp. trasver.
1.050	135	20. 7.38	Egeo	36N 23E	—	Strasb.	Notev. comp. trasver.
1.070	125	4. 6.47	G.fo Salonicco	40N 24E	00.29.45	BCIS	Notev. comp. trasver.
1.100	130	18. 9.38	Peloponneso	38N 24E	—	Strasb.	Notev. comp. trasver.
1.220	150	6.10.47	Grecia	37N 22E	19.55.31	BCIS	Nettamente trasvers.
1.280	135	30. 8.47	Egeo	36N 24E	22.21.36	BCIS	Notev. comp. trasver.
1.420	135	24. 7.48	Creta	35N 24E	06.03.22	USCGS	Nettamente trasvers.
1.420	130	25. 2.35	Creta	36N 24E	—	Strasb.	Nettamente trasvers.
5.650	55	19.10.38	Altai	49N 90E	04.13.29	USCGS	Notev. comp. trasver.
6.100	210	11. 4.46	Cresta Atl.	4S 13W	01.52.06	BCIS	Notev. comp. trasver.
8.650	0 ca	10.11.38	SW Alaska	56N 157W	20.18.48	USCGS	Notev.ma comp. trasvers.
8.700	0 ca	17.11.38	SW Alaska	56N 157W	03.54.48	USCGS	Notev. comp. trasver.
8.900	15 ca	16. 4.40	W Aleutine	54N 175E	06.07.56	ISS	Notev. comp. trasver.
8.990	95	23. 8.36	N Sumatra	6N 95E	21.12.12	USCGS	Comp. trasvers. leggerm. minore della longit.
9.100	10 ca	27. 3.40	Aleutine	52N 178W	12.31.31	ISS	Notev. comp. trasvers.
9.200	10 ca	3. 9.37	Aleutine	52N 178W	18.48.05	USCGS	Notev. comp. trasvers.
9.220	45	28. 6.48	Giappone	36N 137E	07.13.35	USCGS	Notev. comp. trasvers.

Distanza da Trieste (km)	Azimutho	Data	Regione	Coordinate	H (hh.mm.ss)	Determin. da	Osservazioni
9.300	35	5.11.38	Giappone	37N 141E	08.43.24	USCGS	Comp. trasvers. min. della long.
9.350	40	2.11.36	E Giappone	38N 142E	20.46.00	USCGS	Notev. comp. trasvers.
9.390	40 ca	2. 3.32	Pacifico	39N 145E	17.31.01	ISS	Comp. trasvers. leggerm. minore della longit.
9.465	325	21.12.32	Nevada	39N 118W	06.10.12	ISS	Notev. comp. trasvers.
9.500	45	7.12.44	Giappone	33N 137E	04.35.42	USCGS	Notev.ma comp. trasvers.
9.550	40	6.11.38	Giappone	37N 143E	08.53.53	USCGS	Notev.ma comp. trasvers.
9.650	40 ca	23. 5.38	SE Giappone	36N 142E	07.18.32	USCGS	Comp. trasvers. leggerm. minore della longit.
9.750	270 ca	5. 2.38	Colombia	5N 75W	02.23.25	USCGS	» » » » »
10.555	270 ca	2.10.33	Pacifico	2S 81W	15.29.27	ISS	» » » » »
10.850	280 ca	24. 5.40	Perù	12S 77W	16.33.40	USCGS	Notev. comp. trasvers.
10.980	275 ca	21. 6.37	Perù	83S 80W	15.13.00	USCGS	Comp. trasvers. leggerm. minore della longit.
14.000	45 ca	29. 9.46	Salomone	5S 154E	03.02.00	USCGS	Notev. comp. trasvers.
14.350	45	19. 4.36	Salomone	7S 157E	05.07.12	USCGS	Comp. trasvers. leggerm. minore della longit.
14.980	45	10.10.31	Salomone	10S 161E	00.19.59	ISS	« « « « «
15.050	45	15.12.35	Salomone	10S 161E	07.07.54	USCGS	« « « « «
15.065	45	3.10.31	Salomone	11S 162E	19.13.19	ISS	« « « « «
15.445	45	18. 7.34	NW Figi	12S 167E	19.40.22	ISS	Notev. comp. trasvers.

associate, che formano un'onda polarizzata nel piano di propagazione; e che a queste onde è possibile sovrapporre altre che sono *normali* al piano di propagazione: basta quindi ammettere che queste onde si presentino simultaneamente, (cioè) con periodi molto prossimi, perché resti spiegata la caratteristica principale messa sopra in evidenza per le onde che costituiscono la fase massima.

Da quanto sopra messo in evidenza sperimentalmente risulterebbe poi il predominio di queste onde trasversali su quelle polarizzate nel piano principale, sia per quanto riguarda la durata, che per quanto riguarda l'ampiezza.

Resterebbero solo da spiegare le (cospicue) variazioni osservate nella direzione dell'asse maggiore delle ellissi, proiezioni, sia sul piano orizzontale che in quello verticale, del moto descritto da una particella sollecitata dalle onde costituenti la fase massima.

Una volta resa ragione di questo fatto, sarebbero spiegate subito anche le variazioni osservate nel rapporto  $w/u$  (che del resto, come abbiamo visto al § I, sono almeno in parte imputabili alla stratificazione superficiale e alla firmità-elastica).

Ciò tenteremo di fare nel § che segue.

7. *Ipotesi sulla causa delle variazioni osservate nelle traiettorie dei moti corrispondenti alla fase massima.* — Una spiegazione di questo fatto potrebbe essere la seguente:

Dato che il vettore vibrante nella teoria di Somigliana si compone di due parti distinte, di cui la prima (onda del tipo *R*) ha una componente verticale ed una orizzontale, parallela alla direzione di propagazione, e la seconda risulta dalla sovrapposizione di due onde piane associate, l'una longitudinale, l'altra *trasversale*, propagantisi con velocità uguale sulla superficie del suolo, basterebbe ammettere che queste onde — pur conservando la stessa velocità — subissero solo spostamenti di fase o piccole variazioni di periodo, perché esse dessero luogo anzitutto alle caratteristiche figure di Lissajous osservate, e perché in queste l'orientamento delle ellissi subisse variazioni continue.

Per tali sfasamenti basta la presenza di superfici di discontinuità, le quali siano sufficientemente estese e convenientemente orientate perché le onde rifratte (o riflesse) in corrispondenza di punti su queste a distanze opportunamente variabili arrivino alla stazione con variazioni nella differenza di fase. Ciò può rendere ragione:

a) anzitutto dell'oscillazione per ellissi, dato che per una oscil-

lazione completa della particella si può ammettere che la differenza di fase rimanga costante, almeno in prima approssimazione;

*b)* poi della variazione nell'orientamento di queste ellissi, dato che varia lo sfasamento o variano leggermente i periodi;

*c)* infine, unitamente alla firma-viscosità, del caratteristico comportamento a treni d'onda smorzati delle oscillazioni stesse, dato che dalla concordanza di fase si può passare all'opposizione (interferenza); i treni d'onde possono essere addirittura separati completamente, quando l'interferenza è tale da provocare l'estinzione del moto risultante; ed in particolare:

*d)* della variazione di ampiezza e di forma delle ellissi, dato che la rifrazione (o riflessione) in punti diversi della superficie di discontinuità può avvenire secondo rapporti diversi per l'intensità dell'onda rifratta (o riflessa).

Ora, prima di giungere ad una stazione le onde superficiali incontrano generalmente non una, ma parecchie superfici di discontinuità, di natura, inclinazione, orientamento e distribuzione le più disparate: sicché l'ipotesi qui avanzata potrebbe rendere ragione, almeno qualitativamente, della complessità dei fatti osservati.

Non solo, ma essa potrebbe anche spiegare la diversità del comportamento delle onde superficiali da stazione a stazione (v. § 1, *a*), per la quale altrimenti è difficile trovare una spiegazione: a meno di non ammettere, come ha fatto l'Oddone <sup>(1)</sup>, la crosta terrestre suddivisa in blocchi, di cui ognuno può avere due gradi di libertà ed oscillare indipendentemente con due periodi differenti in due piani diversi.

L'ipotesi avanzata più sopra ci sembra attualmente la più verosimile per spiegare la complessità dei fenomeni qui rilevati nelle onde della fase massima. Indichiamo anzi la possibilità di giungere, per suo mezzo e nel caso di situazioni particolarmente favorevoli (specie se con distanze epicentrali non rilevanti), all'individuazione di qualche superficie di discontinuità altrimenti non discernibile. Indirettamente, ne risulterebbe una conferma qualitativa dell'ipotesi qui proposta. Discuteremo ancora questa nel § che segue.

8. *Discussione del metodo e dei risultati.* — *a)* La prima e più importante obiezione al criterio di indagine qui seguito potrebbe riguardare il metodo di analisi sopra adottato, ed in particolare la *realtà fisica* delle onde elementari che esso mette in evidenza. Anche a prescindere dal fatto che il metodo stesso viene applicato ormai da

oltre 30 anni dal prof. Vercelli e dai suoi collaboratori, con risultati oltremodo soddisfacenti e rivelando onde costituenti di realtà fisica sicura e pienamente giustificabile (per es., nei fenomeni meteorologici o con questi collegati, l'onda undecennale dipendente dal ciclo di attività solare, ed i suoi armonici), la natura stessa delle onde qui analizzate, ed il loro caratteristico aspetto a treni d'onde sinusoidali smorzate, fanno intendere che si è in presenza di fenomeni interferenziali. La semplicità degli elementi risultanti, ed il loro aspetto perfettamente sinusoidale, nonché il fatto che il residuo è del tutto trascurabile, sono altri indici a favore della loro realtà fisica. Questa è poi fuori di dubbio quando si consideri il caso dell'onda registrata che consiste di una sola onda elementare pura.

Si potrebbe poi sospettare che anche le onde costituenti messe sopra in evidenza non siano pure, ma risultino della composizione di onde con periodi quasi uguali. Ciò è poco probabile, dato l'ingrandimento effettuato prima di operare l'analisi del sismogramma, e data la selettività degli schemi adoperati.

Ma anche se ammettiamo per ipotesi che così fosse, ed anche che l'analisi periodale avesse messo in evidenza onde costituenti che in tutto, o in parte, si discostano dalla realtà, i risultati generali non cambierebbero per nulla, in quanto permarrrebbe nella fase massima il carattere di trasversalità molto spiccato, e le eventuali onde elementari con componente verticale conserverebbero questo carattere in misura maggiore di quanto sia stato indicato sopra con un'analisi che ha messo in evidenza onde elementari puramente trasversali.

b) La seconda obiezione potrebbe riguardare la *particolarità* dei due casi osservati, nel senso che non sia lecito generalizzare i risultati per essi ottenuti. Abbiamo già detto (§ 2) che i casi stessi sono stati scelti dopo lungo esame e fra molti altri possibili, con il criterio di possedere un carattere di « normalità » e non di eccezionalità. Ma, oltre a questi, abbiamo considerato poi altri 35 casi (§ 5), e tutti confermano i risultati sopra ottenuti.

c) Un'altra obiezione potrebbe essere mossa infine alla situazione particolare di Trieste, per cui i risultati ottenuti sarebbero alterati o dalla posizione geografica della stazione, o dalla struttura del « blocco » su cui essa poggia (nell'ipotesi sopra menzionata di una crosta terrestre suddivisa in blocchi liberi di oscillare per proprio conto).

Per quanto riguarda la posizione geografica, ciò vorrebbe dire che i risultati sono alterati da discontinuità circostanti: e quindi si rientra nel caso per cui appunto si è avanzata l'ipotesi del § 7.

Per quanto riguarda invece l'influenza della struttura « a blocchi » attorno alla stazione registratrice, ed in particolare del « blocco » su cui essa poggerebbe (<sup>11</sup>), pur non volendo rifiutare a priori questa ipotesi, che del resto sembrerebbe molto suggestiva per la concordanza fra le figure elastiche di Lissajous che essa contempla ed il moto osservato, notiamo solo che:

— anzitutto l'ammissione di « blocchi » a sé stanti, di estensioni non molto cospicue, sembra piuttosto problematica; ed in ogni caso molto improbabile in una regione come la nostra, dominata da caratteristiche strutture a strati e pieghe di dimensioni molto estese;

— secondariamente, questi « blocchi » non potrebbero oscillare liberamente, ma essendo collegati con tutti gli altri vicini, subirebbero delle oscillazioni forzate, ed in ogni caso il moto risultante ne sortirebbe molto complicato.

D'altra parte questo stesso fenomeno in un'eventuale struttura a blocchi dovrebbe allora verificarsi non solo per un impulso dovuto alle onde superficiali, ma per un qualunque altro impulso; e quindi in particolare per impulsi dovuti ad onde spaziali, specie nei terremoti ad origine vicina: e per questi non si sono mai riscontrati fenomeni del genere.

Semberebbe quindi lecito affermare che la causa delle caratteristiche figure di Lissajous non sia da ricercarsi nell'oscillazione propria di un « blocco » della crosta terrestre con due gradi di libertà e periodi differenti in direzioni diverse, ma piuttosto alla composizione di due onde contemporanee aventi periodi leggermente diversi, o differenza di fase variabile: cioè appunto quanto suggerito dall'ipotesi del § 7.

d) Resterebbe ancora da vedere quale sia la misura dello spostamento di fase responsabile della rotazione degli assi delle ellissi. Per questo, basta ricordare che una rotazione di 90° si ottiene per una variazione nello sfasamento di 1/4 del periodo. Considerando allora per es. le ellissi del 1° treno d'onde della fig. 5, si avrebbe che per le prime sei ellissi la variazione (unitaria) della differenza di fase è di appena 1/120 del periodo: cioè di 0.2 sec! Come si vede, è più che sufficiente la differenza di periodo osservata nelle varie componenti di un'onda secondo le varie direzioni (v. tabella I e II) per giustificare la rotazione qui discussa.

9. *Conclusioni.* — Quantunque la ricerca qui effettuata debba intendersi solo come un tentativo per risolvere il problema della « fase

massima » di un sismogramma, pure i risultati che in essa sono stati messi in evidenza sono molto significativi. Sembra anzitutto lecito concludere che, mentre le onde di Love si trovano in effetti nella cosiddetta « fase principale » come previsto dalla teoria, e precedono la « fase massima », le onde previste dalla teoria di Rayleigh non si trovano invece quasi mai isolate, bensì o associate ad onde di Love, che continuano ad esistere nel sismogramma anche per buon tratto della fase massima, o comprese nelle onde previste dalla teoria di Somigliana. La polarizzazione nel piano principale non si riscontra quindi quasi mai isolata nella cosiddetta « fase massima », dove invece predominano onde a carattere trasversale.

Questo risultato è importante anche per le applicazioni ai microsismi: risulterebbe infatti così impossibile poterne ricavare — solo su questa base — la direzione di provenienza con i dati di una sola stazione. Tale problema costituiva anzi anche uno degli scopi per il quale è stata eseguita la presente ricerca.

Per la spiegazione delle caratteristiche figure elastiche di Lissajous osservate, sembra sufficientemente fondata l'ammissione di una diversità di periodo, o variazione nella differenza di fase, nelle singole onde componenti. La variazione di questi parametri è sufficiente a giustificare la rotazione osservata negli assi delle ellissi descritte. Quale causa fisica di tali variazioni sembra lecito invocare la presenza di superfici di discontinuità, sufficientemente estese e orientate ed opportunamente distribuite lungo il tragitto delle onde stesse.

Un'estensione delle ricerche è opportuna per la conferma o meno di questa ipotesi di lavoro.

*Istituto Nazionale di Geofisica — Osserv. di Trieste — Ottobre 1949.*

#### RIASSUNTO

*Nella « fase principale » di un sismogramma — qui studiata nella sua natura fisica — vengono trovate onde di Love, ma non le onde previste dalla teoria di Rayleigh. Per vedere se queste vi figurano almeno come onde componenti, la fase principale di due terremoti lontani opportunamente scelti (Giappone, 18 novembre 1941; Perù, 24 agosto 1942) viene scomposta con l'analisi periodale del prof. Vercelli. Le onde componenti risultano però o ancora onde di Love, oppure onde superficiali normali al piano principale con componente verticale. La teoria di Somigliana ammette la possibilità dell'esistenza*

di queste onde. Per render conto dell'oscillazione per ellissi e della rotazione degli assi di queste, viene avanzata l'ipotesi di differenze di fase nelle onde componenti e di variazioni nello sfasamento, generate da riflessioni o rifrazioni su superfici di discontinuità opportunamente distribuite. Viene infine discussa la realtà fisica dei risultati, di cui si mostra l'interesse anche per lo studio dei microsismi.

## BIBLIOGRAFIA

(<sup>1</sup>) DINCA-SAMURACAS A.: *Etudes sur la phase des tremblements de terre dite « Fase maxima »*. Publ. Bur. Centr. Séismol. Intern., s. A., Travaux scient., fasc. n. 12, 1935.

(<sup>2</sup>) PANNOCCHIA G.: *Studio della fase massima di un terremoto lontano*. La Ricerca Scientifica, XII, 5, 595-610, Roma 1941.

(<sup>3</sup>) GEORGI M.: *Sui periodi della fase massima di terremoti lontani*. Annali di Geofisica, I, 1, 116-125, Roma 1948.

(<sup>4</sup>) SEZAWA K.: *Dispersion on elastic waves propagated on the Surface of Stratified Bodies and on Curved Surfaces*. Bull. Earth Res. Inst., III, 1, 1-18, Tokio 1927.

(<sup>5</sup>) JEFFREYS H.: *The Surface Waves of Earthquakes*. M.N.R.A.S., Geophys. Suppl. n. 3, 253-261, 1935.

(<sup>6</sup>) CALOI P.: *Sulla propagazione delle onde di Rayleigh in un mezzo elastico firmo-viscoso stratificato*. Rend. Acc. Naz. Lincei, s. VIII, v. 1, f. 6, Roma 1946.

(<sup>7</sup>) CALOI P.: *Comportamento delle onde Rayleigh in un mezzo firmo-elastico indefinito*. Annali di Geofisica, I, 4, 550-567, 1948.

(<sup>8</sup>) VALLE P. E.: *Sull'equazione della velocità delle onde di Rayleigh*. Ricerca Scientif., XV, 6, dic. 1945.

(<sup>9</sup>) CALOI P.: *Analisi periodale delle onde sismiche e problemi ad essa connessi*. La Ricerca Scientifica, X, 4, 275-290, Roma 1939.

(<sup>10</sup>) GEORGI M. e VALLE P. E.: *Contributo allo studio delle onde M*. Annali di Geofisica, I, 1, 87-102, Roma 1948.

(<sup>11</sup>) VALLE P. E.: *Sul coefficiente di assorbimento delle onde sismiche superficiali*. Ricerca Scientif., XVI, 11, nov. 1946.

(<sup>12</sup>) SOMIGLIANA C.: *Sulla propagazione delle onde sismiche. I*: Rend. Acc. Naz. Lincei, XXVI, s. V, f. 7, 369, aprile 1917; *II*: Ibidem, XXVI, s. V, f. 9, 472, maggio 1917; *III*: Ibidem, XXVII, s. V, f. 1, 13, gennaio 1918.

(<sup>13</sup>) VERCELLI F.: *Analisi periodale dei diagrammi*. Tecnica Italiana, I, 2, 76-85, Trieste 1946.

(<sup>14</sup>) ODDONE E.: *Il moto vero del suolo nella fase massima dei terremoti e le figure elastiche del Lissajous e del Wheastone*. Boll. Com. Naz. Geod. e Geof. C.N.R., s. II, a. VII, n. 3, 1937.