

## RAGGI SISMICI ATTRAVERSO LA TERRA SFERICA

Poiché la velocità delle onde sismiche in generale aumenta con la profondità, i raggi delle onde sismiche saranno concavi verso l'alto (vedi capitolo sul parametro del raggio).

I vari raggi sismici nella Terra sono codificati come segue:

P	onda P nel mantello
S	onda S nel mantello
K	onda P nel nucleo esterno
I	onda P nel nucleo interno
J	onda S nel nucleo interno
k	riflessione dalla discontinuità mantello - nucleo esterno
i	riflessione dalla discontinuità nucleo esterno - nucleo interno
p	onda P riflessa dalla superficie terrestre vicino alla sorgente
s	onda S riflessa dalla superficie terrestre vicino alla sorgente
LR	onda superficiale di Rayleigh
LQ	onda superficiale di Love

Nelle figure successive vengono descritti i vari raggi sismici.

Ad esempio: l'onda **PKP** è un'onda P che si è propagata verso il basso nel mantello, è entrata nel nucleo esterno ed è risalita attraverso il mantello; l'onda **PP** è un'onda P propagatasi nel mantello e che è stata riflessa una volta dalla superficie terrestre.



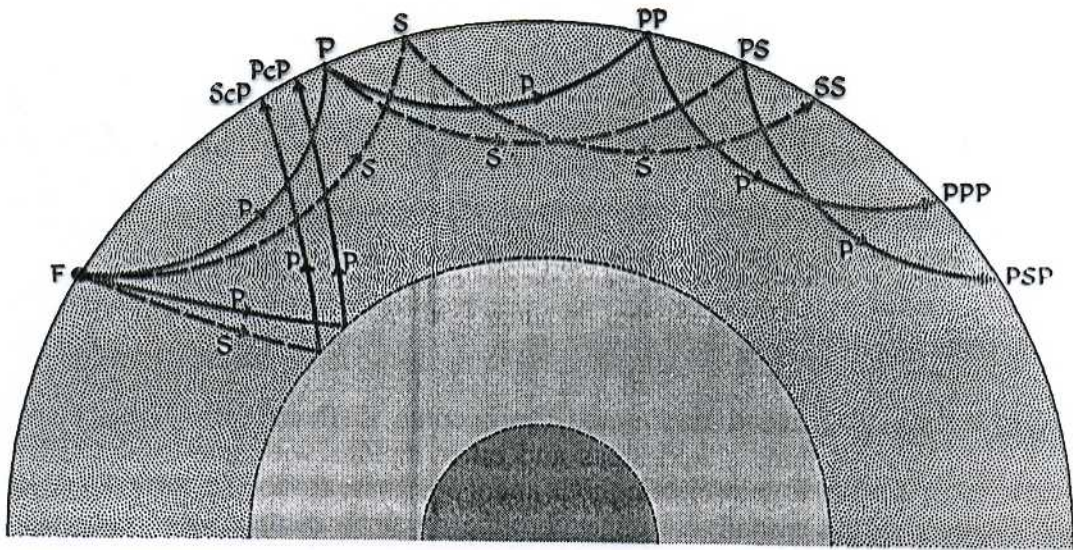


Fig. 14. Examples of propagation paths of direct and reflected waves in the Earth's mantle. Solid and dashed rays are used to distinguish between *P* and *S* waves, respectively. Waves are generated by the surface focus, *F*, of the earthquake which radiates both *P* and *S* waves. Different shadings show the mantle, outer core and inner core. For notation see the text.

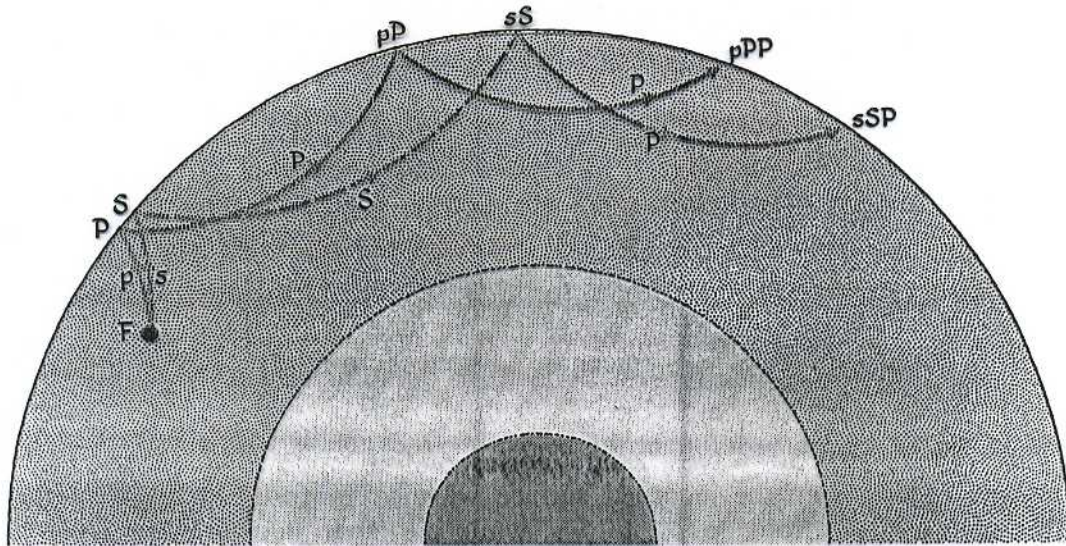


Fig. 15. Examples of propagation paths of depth phases and their notation. Waves begin at the deep focus, *F*, of the earthquake. Conventions as for Fig. 14.

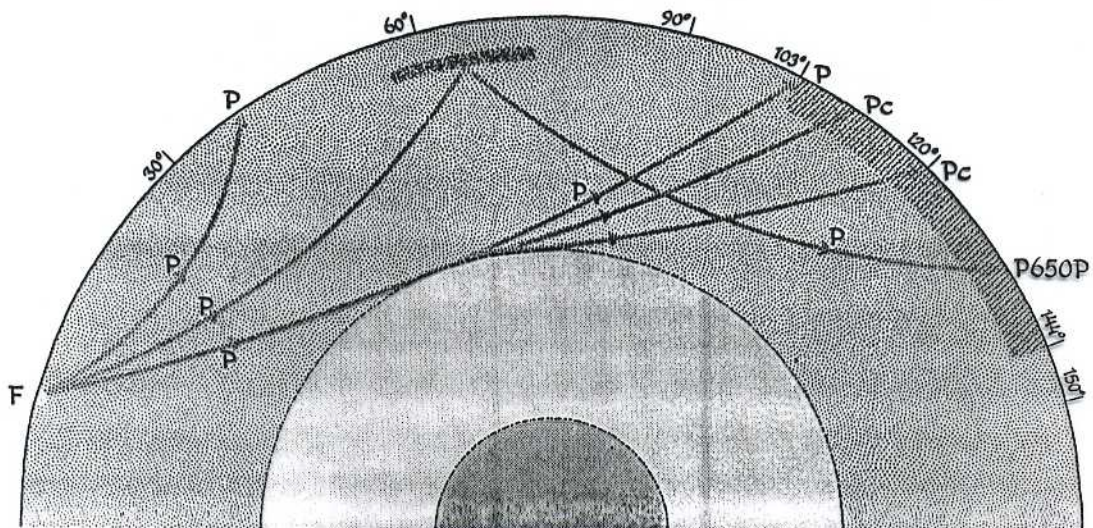


Fig. 16. Examples of propagation paths of direct *P* waves, *P* waves diffracted around the core-mantle boundary and *P* waves reflected downwards at a discontinuity at 650 km depth. The discontinuity and the shadow zone (103-144°) are shaded. Conventions as for Fig. 14.



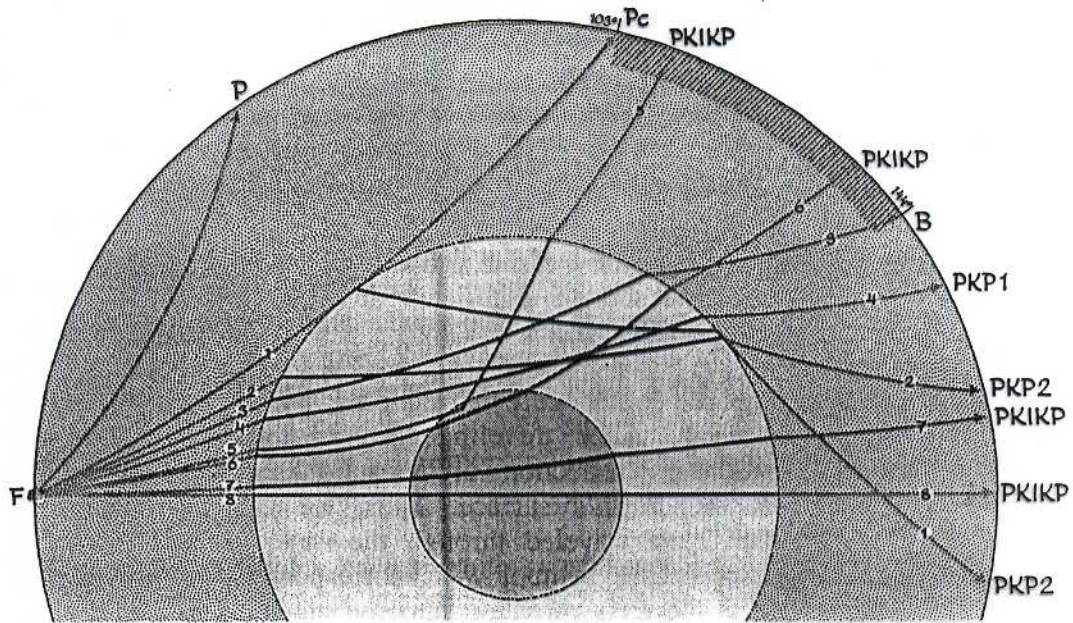


Fig. 17. Examples of propagation paths of *P* waves traveling through the Earth's core. The shadow zone between 103° and 144° is shaded and *B* denotes the caustic point. Rays are numbered in the order of increasing steepness of the initial descent. For details see the text. Conventions as for Fig. 14.

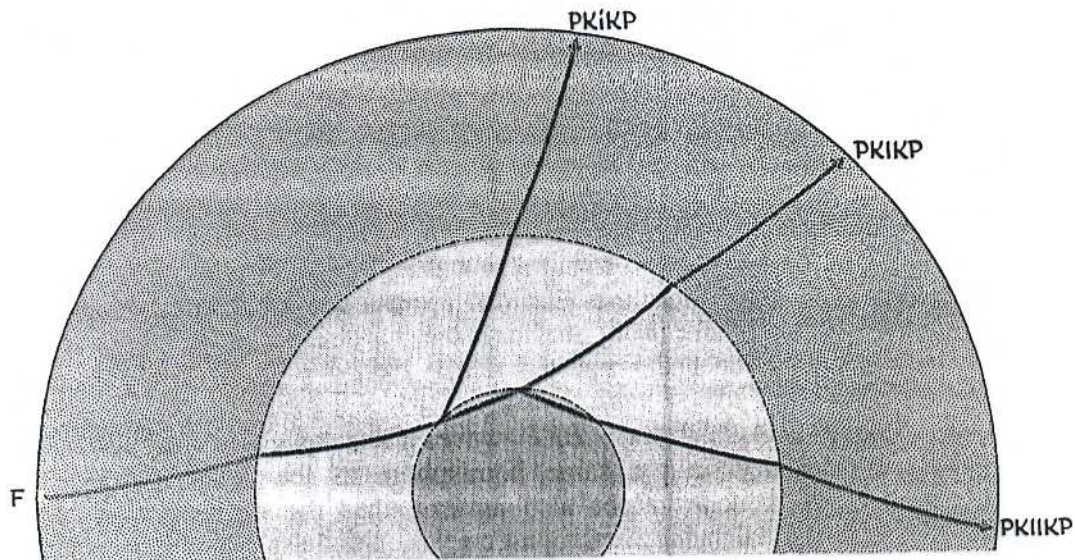


Fig. 18. Propagation paths of *P* waves traversing the Earth's interior from the focus *F* and reflecting at the outside (*PKiKP*) or inside (*PKIIKP*) of the inner core. *PKiKP* is a *P* wave refracted into the outer core and through the inner core. Conventions as for Fig. 14.

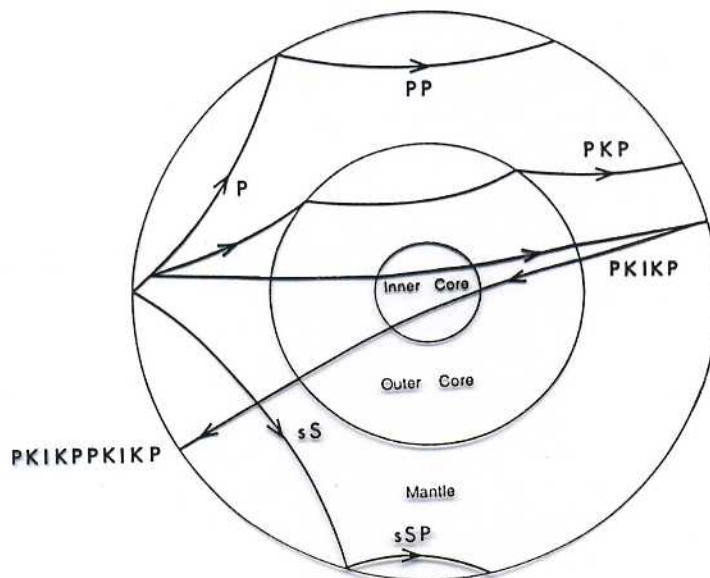
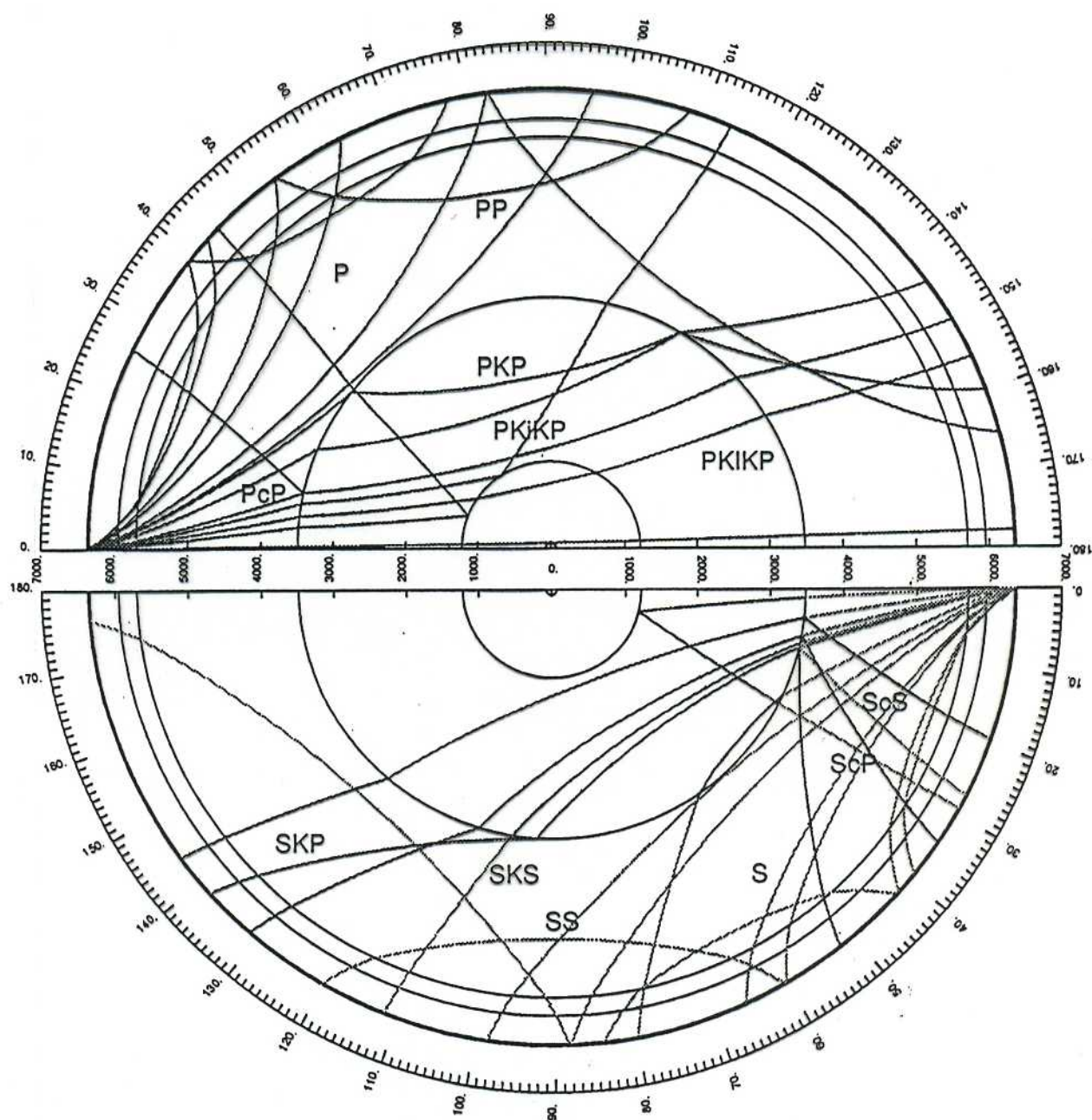
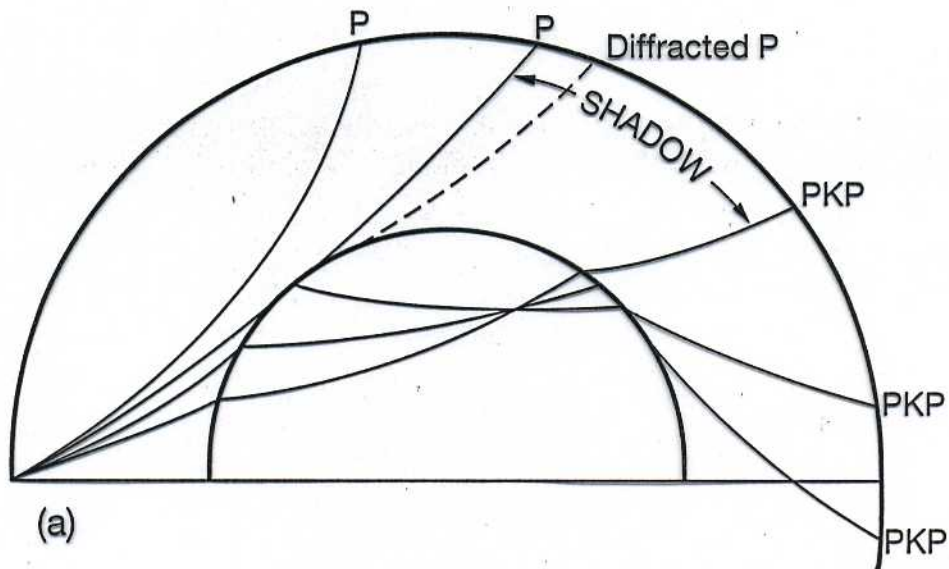


Figure 4.12. Some of the possible ray paths for seismic waves penetrating the earth. In the mantle and core, the velocities increase with depth, so the ray paths bend away from the normal. The decrease in velocity at the mantle-core boundary causes those rays refracted into the core to bend towards the normal.

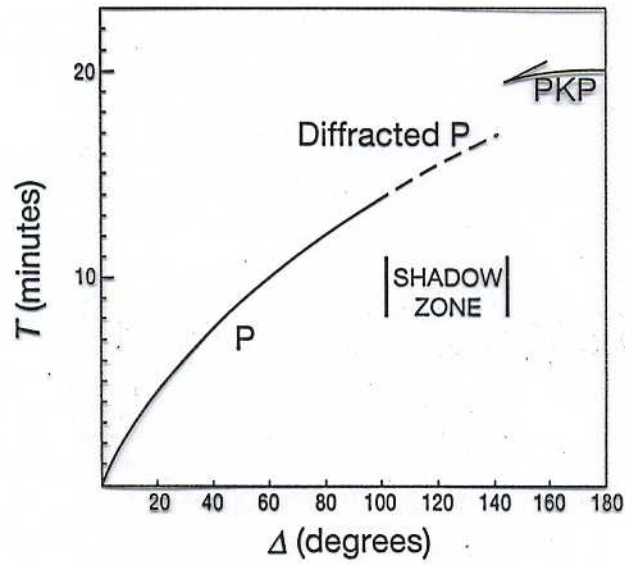




**Figure 5.15.** Paths of seismic rays through the Earth, illustrating their nomenclature. Figure by courtesy of B.L.N. Kennett.

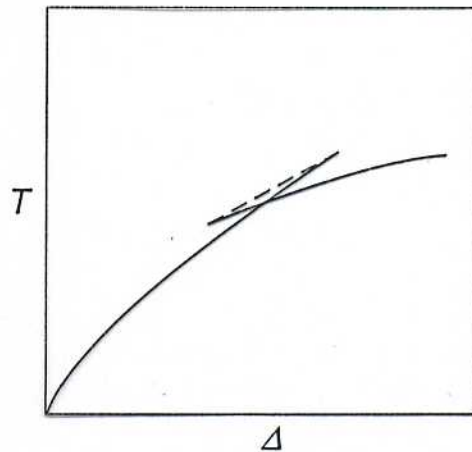
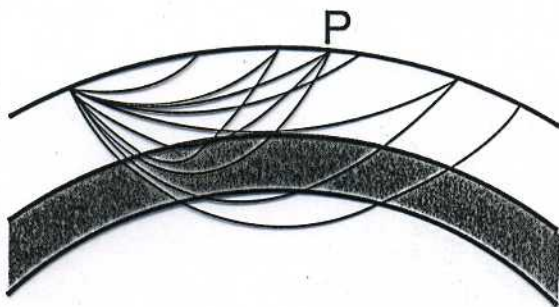


(a)

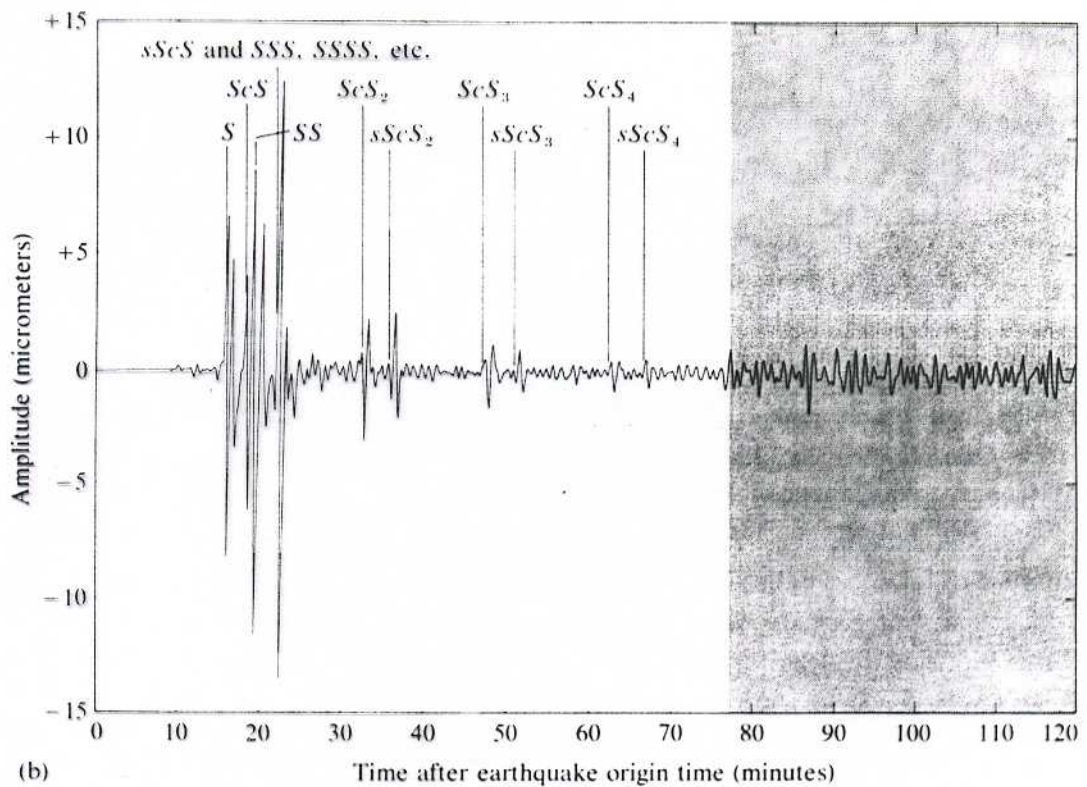
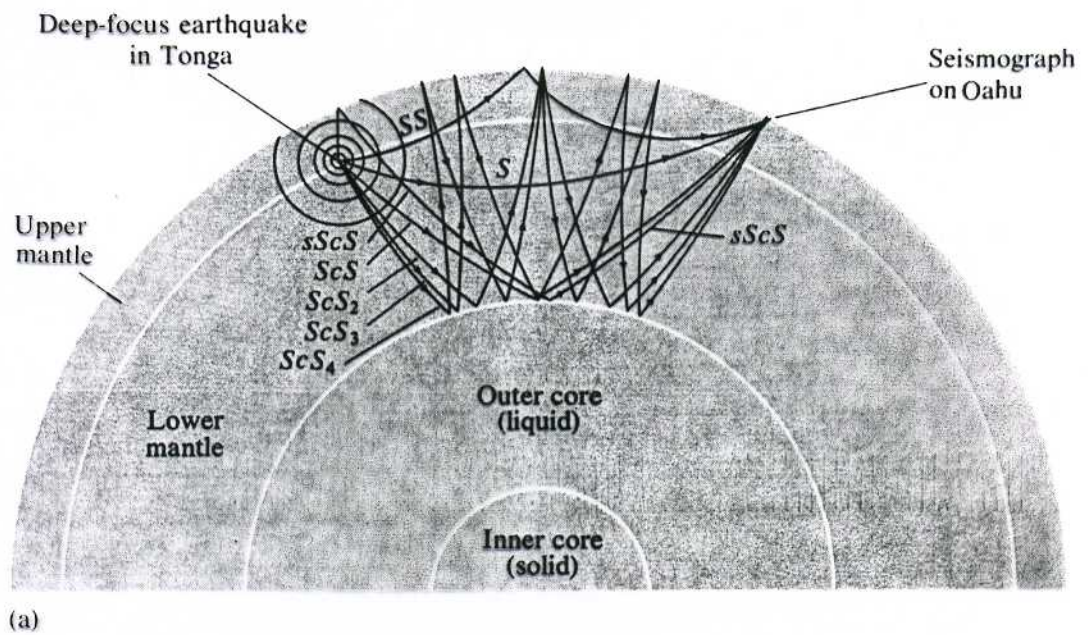


(b)

Un brusco incremento di velocità  
può portare alla triplicazione  
degli arrivi (Figura schematica!)







**Figure 5.3** Multiple surface reflections (a) and seismogram (b) recorded at a seismographic station at Oahu, Hawaii. These waves followed a deep-focus earthquake near the South Pacific island of Tonga in October 1974. [From Thomas H. Jordan, "The Deep Structure of the Continents." Copyright © 1978 by Scientific American, Inc. All rights reserved.]

## Parametro del raggio

Assumiamo la Terra consista in gusci sferici concentrici e che ogni guscio abbia una velocità costante. Consideriamo una parte del raggio sismico (vedi Figura) che attraversa tre di questi strati. Applicando la legge di Snell all'interfaccia A:

$$\sin i_1 / v_1 = \sin f_1 / v_2$$

mentre la stessa operazione all'interfaccia B dà:

$$\sin i_2 / v_2 = \sin f_2 / v_3$$

Dai triangoli rettangoli  $OQP_1$  ed  $OQP_2$  possiamo esprimere il lato comune  $q$  con:

$$q = OP_1 \sin f_1 = r_1 \sin f_1$$

$$q = OP_2 \sin i_2 = r_2 \sin i_2$$

Dalle due uguaglianze risulta:

$$r_1 \sin f_1 = r_2 \sin i_2$$

Moltiplicando le uguaglianze derivate dalla legge di Snell alla interfaccia A per  $r_1$  ed all'interfaccia B per  $r_2$  e utilizzando il risultato ottenuto si trova:

$$r_1 \sin i_1 / v_1 = r_1 \sin f_1 / v_2 = r_2 \sin i_2 / v_2 = r_2 \sin f_2 / v_3$$

Ad ogni interfaccia risulta pertanto costante l'espressione

$$p = r \sin i / v$$

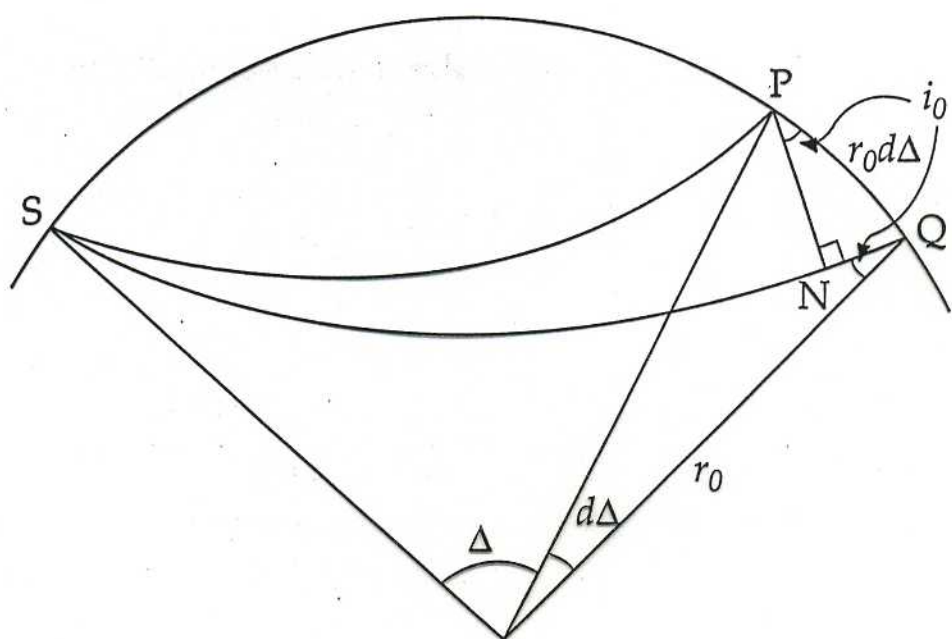
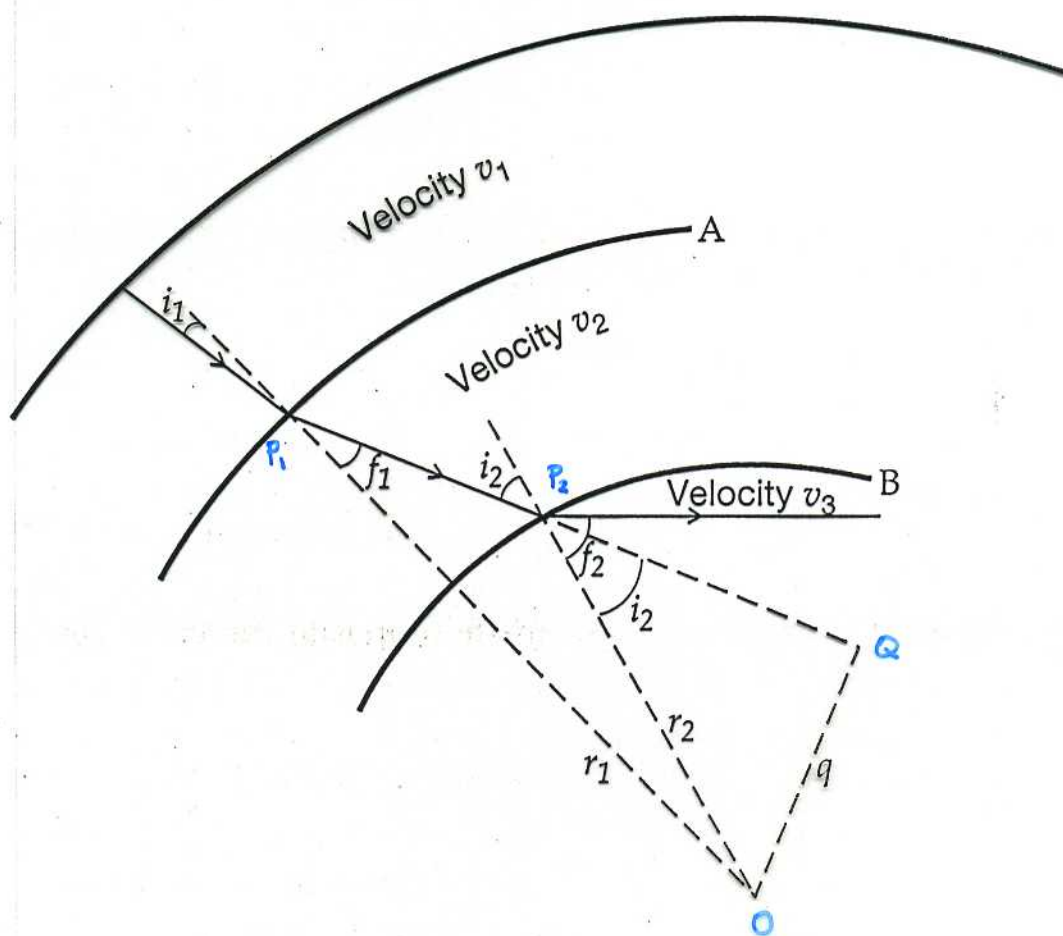
che chiameremo *parametro del raggio*. Il parametro del raggio risulta pertanto una quantita' costante lungo il raggio.

Nel punto di massima penetrazione (punto di volta) l'angolo  $i$  risulta essere  $\pi/2$ . Il parametro  $p$  sara' pertanto:

$$p = r_{\min} / v$$

con  $r_{\min}$  la distanza dal centro della Terra a cui il raggio volta verso l'alto e  $v$  e' la velocita' in quel punto. Ovviamente il valore di  $p$  risulta diverso per ogni raggio.





Consideriamo ora due raggi adiacenti SP ed SQ. Il raggio piu' breve SP arriva ad una distanza angolare  $\Delta$ , mentre il raggio SQ arriva alla distanza  $\Delta + d\Delta$ . Indichiamo con T il tempo di tragitto per il raggio SP e con T+dT quello per il raggio SQ.

Nel minuscolo triangolo rettangolo PNQ l'angolo  $i_0$  sara' dato da:

$$\sin i_0 = NQ/PQ$$

Assumendo hce la velocita' delle onde sismiche vicino alla superficie sia  $v_0$  il lato NQ e' dato da

$$NQ = v_0 dT$$

mentre il lato PQ e' dato da

$$PQ = r_0 d\Delta$$

Sostituendo le due espressioni in quella per  $\sin i_0$  si trova:

$$\sin i_0 = v_0 dT / r_0 d\Delta$$

Otteniamo quindi

$$p = r_0 \sin i_0 / v_0 = dT / d\Delta$$

Il parametro del raggio risulta pertanto uguale alla pendenza della curva tempo di tragitto in funzione della distanza epicentrale angolare. E' quindi per una data fase (P, S ecc.) una funzione della distanza angolare epicentrale osservata.



## ESEMPIO

Proviamo a calcolare il raggio di emergenza dalla sorgente rispetto alla verticale (take-off angle) di un raggio sismico e ricavare la sua massima profondità di penetrazione!

Consideriamo un evento alla base della crosta ( $h = 33 \text{ km}$ ) ed il raggio che arriva alla distanza di  $\Delta = 43^\circ$ .

Dalle tabelle dei tempi di arrivo di Jeffreys-Bullen ricaviamo che la differenza  $dT$  minima (tabulata nell'ultima colonna per ciascuna profondità - nel nostro caso  $0.00^\circ$  equivale a  $33 \text{ km}$ ) è

$$dT = 8.1 \text{ s/deg}$$

rispetto alla distanza di  $44^\circ$ . Pertanto, convertendo i gradi in radianti avremo

$$p = \frac{dT}{d\Delta} = 464 \text{ s}$$

Pertanto dalla  $p = \frac{r}{v} \sin i$  possiamo ricavarci l'angolo  $i$  conoscendo  $r$  e  $v$ .

$$r = R - h = (6371 - 33) \text{ km} = 6338 \text{ km}$$

Inoltre, alla base della crosta il modello di velocità di Jeffreys e Bullen dà una velocità  $v = 7.75 \text{ km/s}$  per le onde P (vedi tabella!). Pertanto

$$\sin i = \frac{464 \text{ s} \cdot 7.75 \text{ km/s}}{6338 \text{ km}} = 0.56737$$

$$i \approx 34.6^\circ$$

Dalla tabella velocità in funzione della profondità si cerca il rapporto tra  $r/R$  e  $\alpha$  che vale

$$\frac{P}{R} = \frac{464 \text{ s}}{6371 \text{ km}} = 0.073 \text{ s/km}$$

Infatti risulta

$$P = \frac{r \sin i}{v} = \frac{r_0}{v(r_0)}$$

con  $r_0$  la profondità di massima penetrazione del raggio e  $v(r_0)$  la velocità corrispondente. Per l'onda P vale:

$$\frac{P}{R} = \frac{r_0/R}{\alpha(r_0)}$$

Il rapporto  $0.073 \text{ s/km}$  lo si trova per

$$r/R = 0.84 \quad \alpha = 11.50 \text{ km/s}$$

che corrisponde ad una profondità di circa 1000 km.



$\Delta$	Depth $h =$							$\times$ <i>raggio terrestre</i>
	Surface	0.005	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	
	m s	m s	m s	m s	m s	m s	m s	
30	6 12.5 88	6 07.7 89	6 01.6 88	5 55.7 88	5 49.9 87	5 44.4 87	5 39.2 86	
31	6 21.3 88	6 16.6 89	6 10.4 88	6 04.5 87	5 58.6 87	5 53.1 86	5 47.8 86	
32	6 30.1 87	6 25.4 87	6 19.1 87	6 13.2 86	6 07.3 86	6 01.7 86	5 56.4 85	
33	6 38.8 87	6 34.1 86	6 27.8 86	6 21.8 85	6 15.9 85	6 10.3 85	6 04.9 85	
34	6 47.5 86	6 42.7 86	6 36.4 85	6 30.3 85	6 24.4 85	6 18.8 84	6 13.4 84	
35	6 56.1 85	6 51.3 85	6 44.9 85	6 38.8 84	6 32.9 84	6 27.2 84	6 21.8 84	
36	7 04.6 84	6 59.8 84	6 53.4 84	6 47.2 84	6 41.3 84	6 35.6 84	6 30.2 83	
37	7 13.0 84	7 08.2 84	7 01.8 83	6 55.6 84	6 49.7 83	6 44.0 83	6 38.5 83	
38	7 21.4 84	7 16.6 83	7 10.1 83	7 04.0 83	6 58.0 83	6 52.3 82	6 46.8 82	
39	7 29.8 83	7 24.9 83	7 18.4 83	7 12.3 82	7 06.3 82	7 00.5 82	6 55.0 82	
40	7 38.1 82	7 33.2 83	7 26.7 82	7 20.5 82	7 14.5 82	7 08.7 82	7 03.2 81	
41	7 46.3 82	7 41.5 82	7 34.9 82	7 28.7 82	7 22.7 81	7 16.9 81	7 11.3 81	
42	7 54.5 82	7 49.7 82	7 43.1 82	7 36.9 81	7 30.8 81	7 25.0 80	7 19.4 80	
43	8 02.7 81	7 57.9 81	7 51.3 81	7 45.0 80	7 38.9 80	7 33.0 80	7 27.4 80	
44	8 10.8 81	8 06.0 80	7 59.4 80	7 53.0 80	7 46.9 79	7 41.0 79	7 35.4 79	
45	8 18.9 79	8 14.0 80	8 07.4 79	8 01.0 79	7 54.8 79	7 48.9 78	7 43.3 78	
46	8 26.8 79	8 22.0 78	8 15.3 79	8 08.9 79	8 02.7 79	7 56.7 78	7 51.1 77	
47	8 34.7 79	8 29.8 78	8 23.2 79	8 16.7 78	8 10.4 78	8 04.5 77	7 58.8 77	
48	8 42.6 79	8 37.7 79	8 31.0 78	8 24.5 78	8 18.2 78	8 12.2 77	8 06.5 77	
49	8 50.3 77	8 45.4 77	8 38.7 77	8 32.2 76	8 25.8 76	8 19.8 75	8 14.1 75	
50	8 58.0 76	8 53.1 76	8 46.4 76	8 39.8 76	8 33.4 75	8 27.3 74	8 21.6 74	
51	9 05.6 76	9 00.7 75	8 54.0 75	8 47.4 75	8 40.9 74	8 34.7 74	8 29.0 74	
52	9 13.2 75	9 08.2 75	9 01.5 75	8 54.9 74	8 48.3 74	8 42.1 73	8 36.4 73	
53	9 20.7 73	9 15.7 74	9 09.0 73	9 02.3 73	8 55.7 73	8 49.4 72	8 43.7 72	
54	9 28.0 74	9 23.1 73	9 16.3 73	9 09.6 73	9 03.0 72	8 56.6 72	8 50.9 71	
55	9 35.4 72	9 30.4 72	9 23.6 72	9 16.9 72	9 10.2 71	9 03.8 71	8 58.0 71	
56	9 42.6 72	9 37.6 72	9 30.8 72	9 24.1 72	9 17.3 71	9 10.9 70	9 05.1 70	
57	9 49.8 70	9 44.8 70	9 37.9 71	9 31.1 70	9 24.4 70	9 17.9 70	9 12.0 69	
58	9 56.8 70	9 51.8 70	9 44.9 70	9 38.1 70	9 31.4 70	9 24.9 69	9 18.9 69	
59	10 03.8 69	9 58.8 69	9 51.8 69	9 45.1 68	9 38.3 68	9 31.8 68	9 25.8 67	
60	10 10.7 68	10 05.7 68	9 58.7 68	9 51.9 68	9 45.1 67	9 38.6 67	9 32.5 66	
61	10 17.5 68	10 12.5 67	10 05.5 67	9 58.7 67	9 51.8 67	9 45.3 66	9 39.1 66	
62	10 24.3 66	10 19.2 67	10 12.2 67	10 05.4 66	9 58.5 66	9 51.9 65	9 45.7 65	
63	10 30.9 66	10 25.9 65	10 18.9 65	10 12.0 65	10 05.1 65	9 58.4 64	9 52.2 64	
64	10 37.5 65	10 32.4 65	10 25.4 65	10 18.5 65	10 11.6 64	10 04.9 64	9 58.6 64	
65	10 44.0 64	10 38.9 64	10 31.9 64	10 25.0 64	10 18.0 64	10 11.3 63	10 05.0 63	
66	10 50.4 64	10 45.3 63	10 38.3 63	10 31.4 63	10 24.4 63	10 17.6 63	10 11.3 63	
67	10 56.8 63	10 51.6 63	10 44.6 62	10 37.7 62	10 30.7 62	10 23.9 62	10 17.6 62	
68	11 03.1 62	10 57.9 62	10 50.8 62	10 43.9 61	10 36.9 61	10 30.1 61	10 23.7 61	
69	11 09.3 61	11 04.1 61	10 57.0 61	10 50.0 61	10 43.0 61	10 36.2 61	10 29.8 61	
70	11 15.4	11 10.2	11 03.1	10 56.1	10 49.1	10 42.3	10 35.0	

Table 4.1: Part of the Jeffreys-Bullen travel time tables. Reprinted with permission from Jeffreys & Bullen (1970).

*P-waves*

Shell			Outer core			Inner core	
$r/R$	$\alpha$ (km./sec.)	$\beta$ (km./sec.)	$r/R$	$r/R_1$	$\alpha$ (km./sec.)	$r/R_2$	$\alpha$ (km./sec.)
1.00	7.75	4.353	0.548	1.00	8.10	1.0	11.16
0.99	7.94	4.444	0.537	0.98	8.18	0.9	11.19
0.98	8.13	4.539	0.526	0.96	8.26	0.8	11.21
0.97	8.33	4.638	0.515	0.94	8.35	0.7	11.23
0.96	8.54	4.741	0.504	0.92	8.44	0.6	11.25
0.95	8.75	4.850	0.493	0.90	8.53	0.5	11.27
0.94	8.97	4.962	0.482	0.88	8.63	0.4	11.28
0.93	9.50	5.227	0.471	0.86	8.74	0.3	11.29
0.92	9.91	5.463	0.460	0.84	8.83	0.2	11.30
0.91	10.26	5.670	0.449	0.82	8.93	0.0	11.31
0.90	10.55	5.850	0.438	0.80	9.03		
0.88	10.99	6.125	0.427	0.78	9.11	$(R_2 = 0.36R_1$ $= 0.197R$ $= 1250 \text{ km.})$	
0.86	11.29	6.295	0.416	0.76	9.20		
0.84	11.50	6.395	0.406	0.74	9.28		
0.82	11.67	6.483	0.395	0.72	9.37		
0.80	11.85	6.564	0.384	0.70	9.44		
0.78	12.03	6.637	0.373	0.68	9.52		
0.76	12.20	6.706	0.362	0.66	9.58		
0.74	12.37	6.770	0.351	0.64	9.65		
0.72	12.54	6.833	0.340	0.62	9.72		
0.70	12.71	6.893	0.329	0.60	9.78		
0.68	12.87	6.953	0.318	0.58	9.84		
0.66	13.02	7.012	0.307	0.56	9.90		
0.64	13.16	7.074	0.296	0.54	9.97		
0.62	13.32	7.137	0.285	0.52	10.03		
0.60	13.46	7.199	0.274	0.50	10.10		
0.58	13.60	7.258	0.263	0.48	10.17		
0.56	13.64	7.314	0.252	0.46	10.23		
0.55	13.64	7.304	0.241	0.44	10.30		
			0.230	0.42	10.37		
			0.219	0.40	10.44		
			0.208	0.38	9.92		
			0.197	0.36	9.40		

$$(R_1 = 0.548R = 3473 \text{ km.})$$

Table 4.2: Velocity as a function of depth in the Earth.  $R_1$  and  $R_2$  are the radii of outer and inner cores respectively. From JEFFREYS (1976)



## LOCALIZZAZIONE PRELIMINARE DI TELESISMI CON TRE STAZIONI

- 1) Lettura fasi e relativi tempi di arrivo
- 2) Determinazione della distanza dell'evento dalle diromicrone

L'epicentro si trova su un piccolo cerchio con centro la stazione e per raggio la distanza angolare misurata.

Per due stazioni le intersezioni tra i due cerchi danno due punti.

Con una terza stazione si sceglie l'epicentro corretto.

---

Si possono tracciare i piccoli cerchi sul globo, ma è più conveniente tracciarli su una proiezione stereografica con un compasso.

NE. Il centr. del disipio sul globo non coincide con il centr. del circolo sulla proiezione. Questo ultimo è il punto intermedio tra i due punti così ottenuti: intersezione tra il grande circolo passante per l'origine e la stazione (linea retta sulla proiezione) ed il piccolo cerchio con centro la stazione.

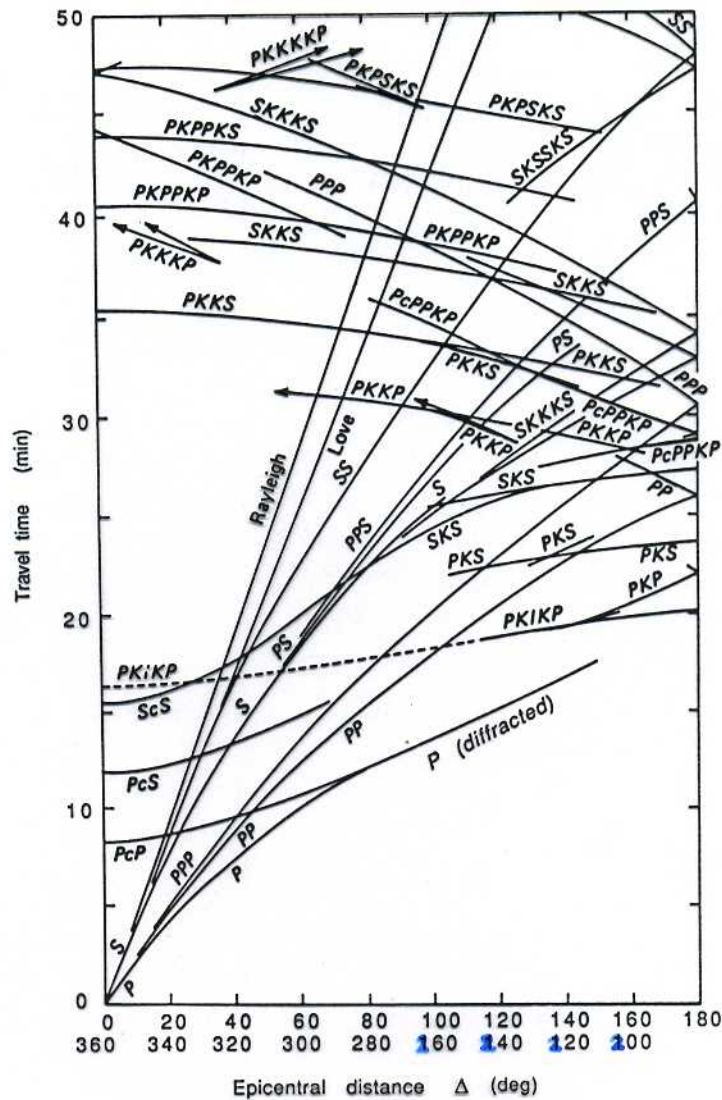


Figure 4.13. Jeffreys-Bullen (J-B) travel-time curves for earthquake focus at the surface, with some modifications. Such curves are usually accurate to a few seconds. Epicentral distance is the angle subtended by the earthquake epicentre and seismometer at the centre of the earth. (After Bullen and Bolt 1985.)

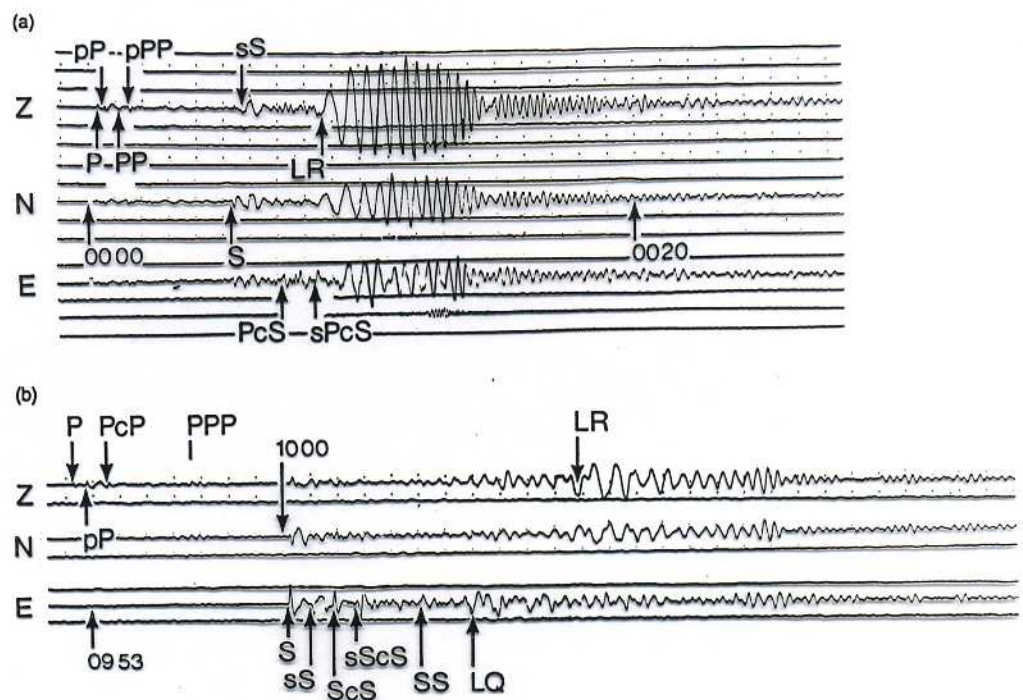


Figure 4.14. Examples of long-period earthquake records. Z is the vertical component and N (north) and E (east) the two horizontal components. Time marks (dots) are every minute. The recordings are made in ink on a rotating drum – hence the other traces above and below the earthquake. (a) Offshore Nicaragua, focal depth 70 km, surface wave magnitude 5.7, recorded in New York. Note the clear dispersion of the Rayleigh waves. (b) Northern Chile, focal depth 129 km, surface wave magnitude 6.5, recorded in New York. (From Simon 1981.)



# LETTURA FASI E TEMPI D' ARRIVO

STRUMENTO	HR:MIN	DISTANZA DAL MINUTO (MM)	TEMPO (S)	TEMPO DAL 1° ARRIVO	CONVERSIONE IN MM	FASE
BUL 1	05:25	16 / 54.5	17.6	0	0	P
BUL 2	05:33	31 / 54.5	34.1	8' 16.5"	49.6	S

# LOCALIZZAZIONE (DISTANZA) PER EVENTI TELESISMICI

Figure 4.20: Determining the distance to the earthquake having measured several arriving phases. Mark the arrival times on graph paper and lay it parallel to the time axis in Figure 4.19. Slide the graph paper along the distance axis until the marks line up.

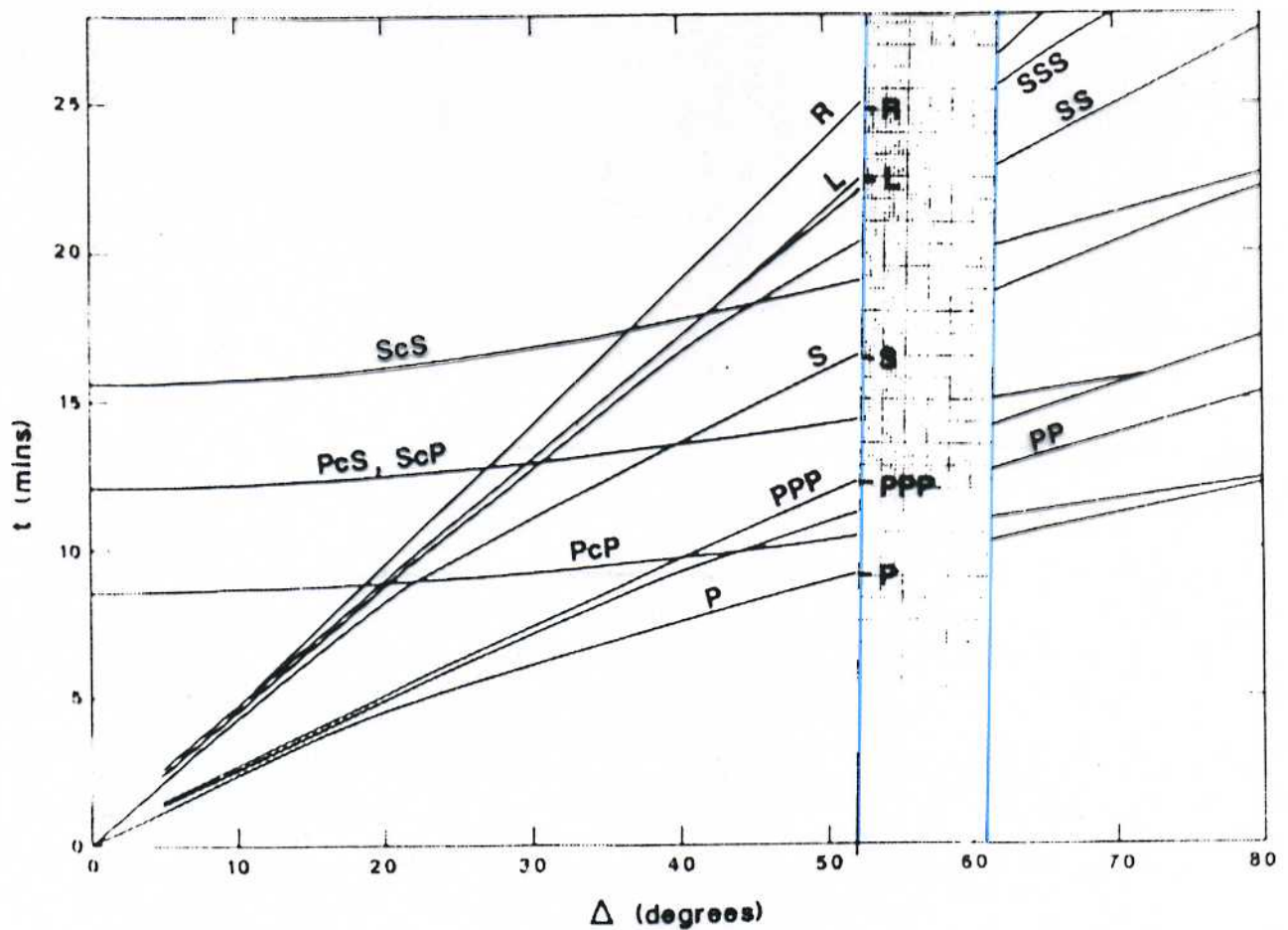
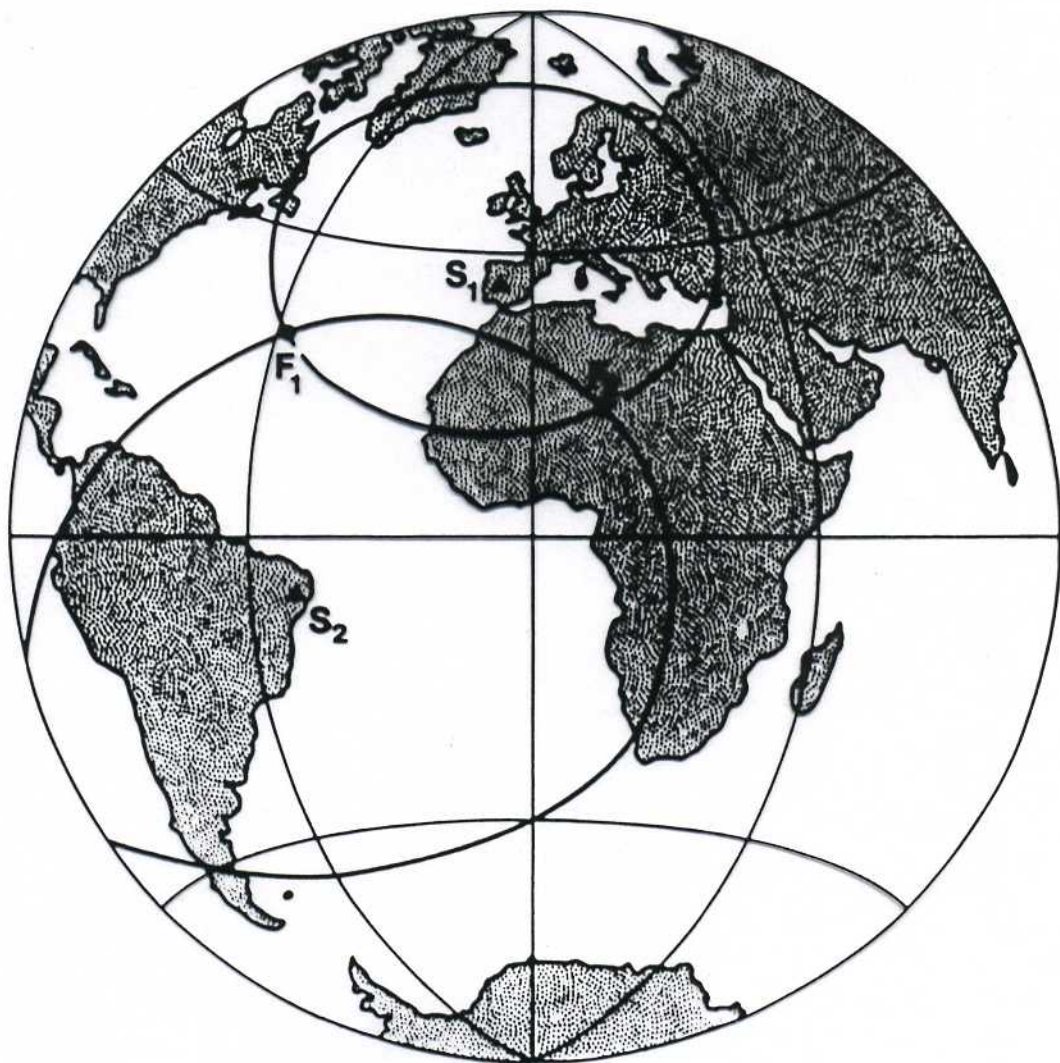




Figure 4.18:  $S_1$  and  $S_2$  are two seismic stations. The epicentre lies on a small circle centred on a station with radius the angular distance between them. If distances can be obtained from arrivals at two stations there are two possible locations of the events,  $F_1$  and  $F_2$ , the intersection points of the two circles. A third station can be used to determine which of the two points is the true epicentre.





# OS

IN THIS ISSUE: FORUM, PAGE 584 ■ SECTION NEWS, PAGE 585

■ 1998 OCEAN SCIENCES MEETING HIGHLIGHTS AND SESSION SUMMARY, PAGE 586 ■ BOOK REVIEWS, PAGE 587

## a Comprehensive Catalog of Historical Seismicity

by Eric A. Bergman, Thomas M. Boyd, E. Robert W. Frazier, Margo M. Harden, Jennifer L. Orth, and Kaye M. Shedlock

Geological Survey

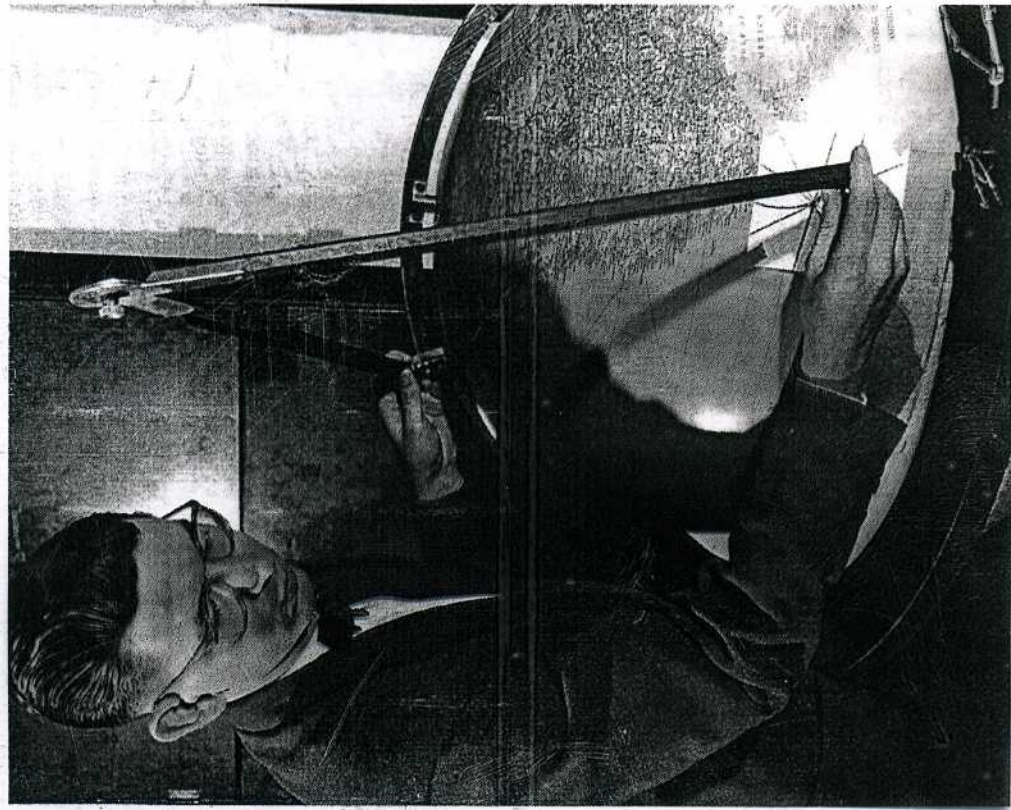
Ado School of Mines  
project to locate more  
akes recorded by instru-  
1900 to 1963. Seis-  
hereafter referred to as  
ollowing *Lee et al.*

understood, even for ba-  
earthquake locations  
cases this is the result  
in the distribution, re-  
and timing of the in-  
ocations for most of the  
are poorly determined  
in data analysis tech-  
applied to the available  
ons, which are mainly  
ulletins and not in a  
l format. The arduous  
these data has pre-  
analysis and relocation

order of several decades, with longer inter-  
vals in regions away from plate boundaries,  
at best only one seismic cycle has been re-  
corded by modern global networks, and only  
the last 3 decades of that cycle have been in-  
tensively studied. For the period 1964 to the  
present, modern instrumental data for moder-  
ate-to-large earthquakes worldwide are avail-  
able in digital form from the International  
Seismological Centre (ISC) and the USGS's  
National Earthquake Information Center  
(NEIC).

Our primary motivation for creating a digi-  
tal catalog of earthquakes prior to 1964 is to  
extend our observational database of earth-  
quakes over as long a time period as possible  
in order to support and advance comprehen-  
sive seismic hazard analyses as well as stud-  
ies of global and regional seismotectonics,  
the seismic cycle, the rupture zones of large  
earthquakes, the spatial-temporal pattern of  
seismic moment release along seismic zones  
or faults and the repeat time of large damag-

*Fig. 1. Before the widespread use of computers, earthquakes were located manually on globes such as the one pictured here. Epicenters were determined by triangulation, drawing arcs with a large compass centered on the stations that recorded the earthquake. The locations obtained using these crude methods are still the only available estimates for most of the earthquakes located before the 1960s. Photo courtesy of the National Earthquake Information Center archives.*

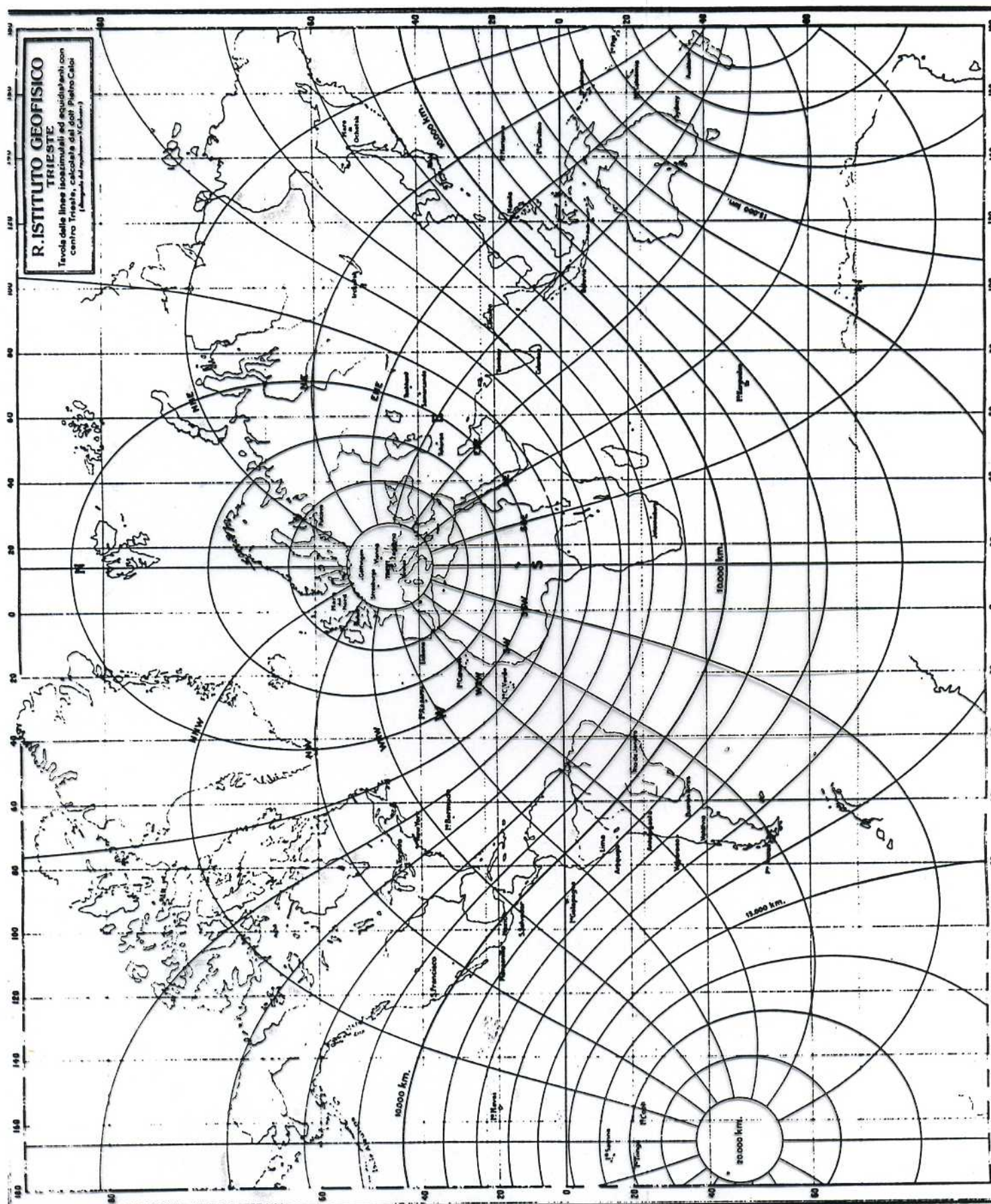


120-station global network of high-quality, well-calibrated electromagnetic instruments starting point of any global or regional study.

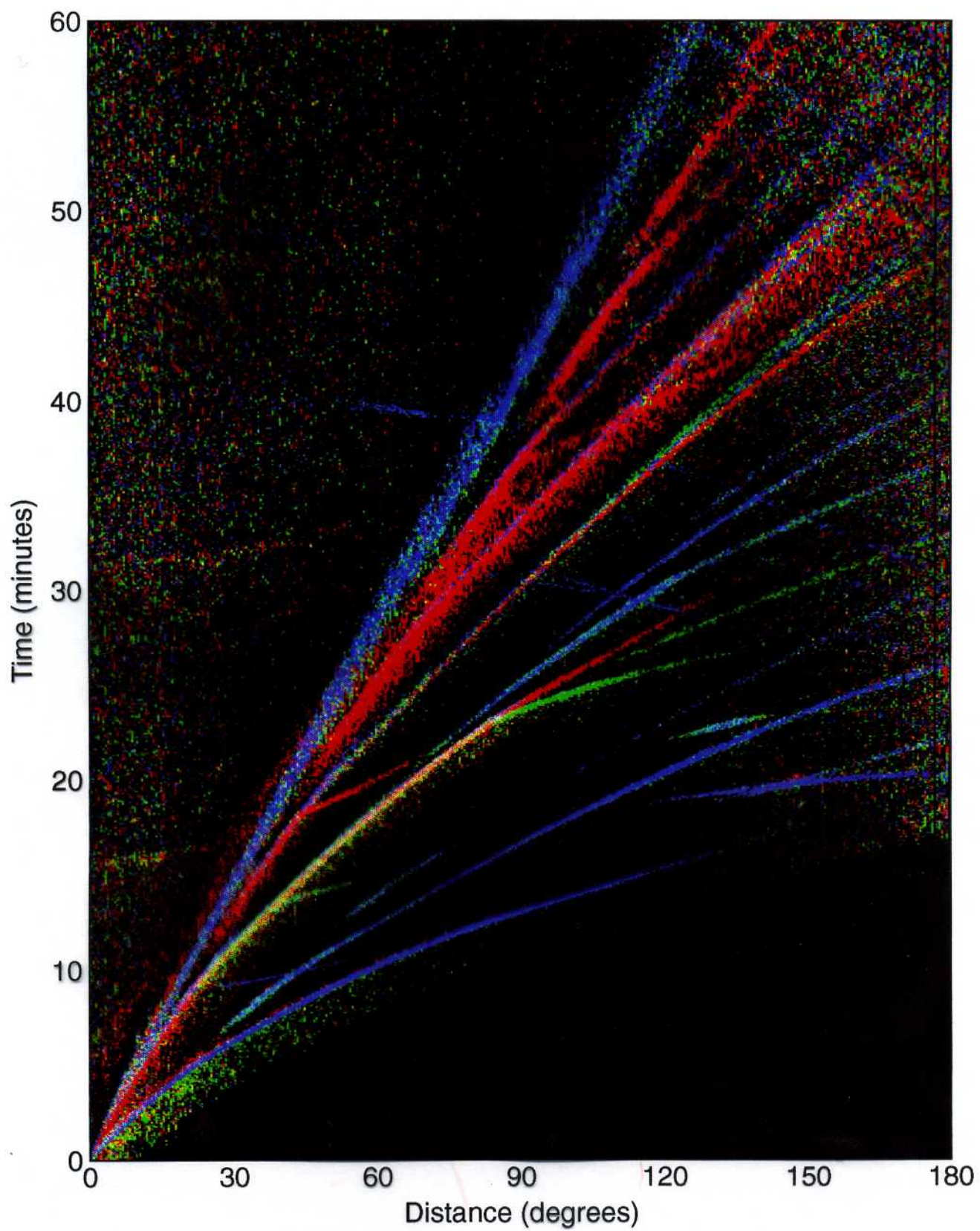


**R. ISTITUTO GEOFISICO  
TRIESTE**

Tavola delle linee isosimili ed equidistanti con  
centro Trieste, calcolata dal dott. Pietro Calvi  
(dall'angolo del meridiano V. Calvi)









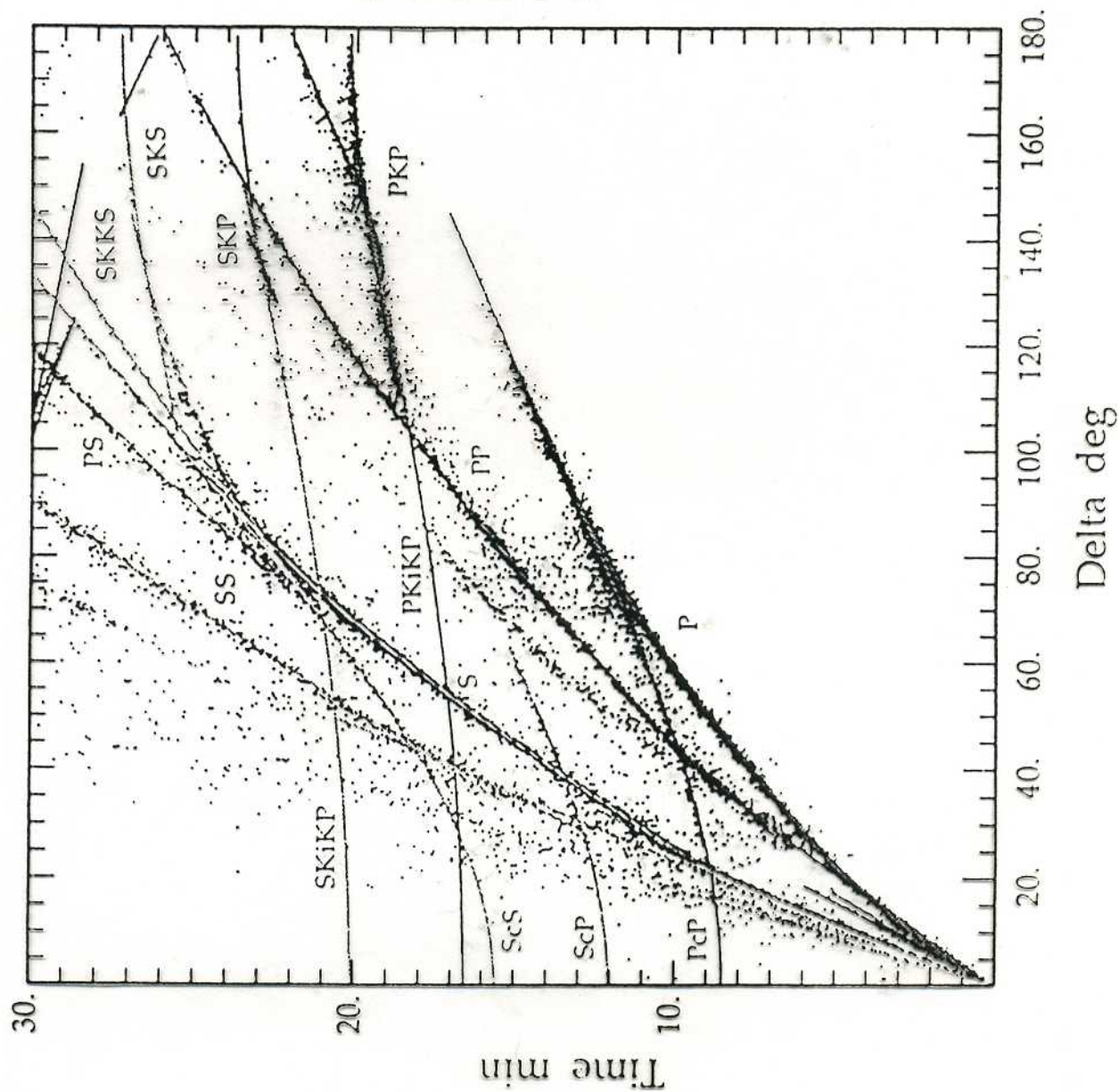


Figure 1. Display of iasp91 travel times superimposed on the times of phases reported for the 104 test events (corrected to surface focus).

