



Departamento de Geofísica, Universidad de Concepción

Fases Sísmicas y la Estructura de la Tierra

La ecuación de ondas - Oscilaciones temporo-espacial - Propiedades de ondas - Ondas de cuerpo - Ondas de superficie - Ley de Snell - Geometría de rayos - Conversión P-S - Fases sísmicas - Ondas de cuerpo - atenuación - Ondas de superficie - dispersión - Mediciones en sismómetros - Componentes transversal y radial - Evento local - Evento telesísmico - Una explosión nuclear - Megaterremotos - Curvas de tiempo de viaje - Preguntas Pendientes ...

New Manual of Seismological Observatory Practice (NMSOP-2) -

<http://bib.telegrafenberg.de/publizieren/vertrieb/nmsop/>

Quake-Catcher Network - Stanford University - <http://qcn.stanford.edu/>

Real-time Seismogram Displays - <https://earthquake.usgs.gov/monitoring/seismograms>

La ecuación de ondas

La ecuación de onda se refiere a una función que satisface:

$$\nabla^2 u - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0$$

donde u puede representar la amplitud del desplazamiento de la Tierra, y c representa la velocidad de propagación de la onda. En una dimensión, $\nabla^2 u = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$, y la solución es una oscilación:

$$u = A \sin(kx - \omega t)$$

donde A es la amplitud de la oscilación, k es el número de onda^[1], $\omega (= 2\pi f)$ es la frecuencia angular y la solución cumple la relación

$$\omega = ck$$

Noten que una posición fija (x constante) se oscila en el tiempo, y que a un cierto tiempo t la oscilación se ve como una onda en el espacio.

^[1] *El número de onda define la dirección de propagación de la onda, en este caso se propaga en la dirección $+\hat{x}$*

La ecuación de ondas

En tres dimensiones, $\nabla^2 u = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}$ y la solución es una oscilación:

$$u = A \sin(k_x x + k_y y + k_z z - \omega t)$$

Aquí, $\bar{k} = (k_x, k_y, k_z)$ es el vector de onda que define la dirección de propagación de la onda (se puede pensar en la dirección de transmisión de energía, típicamente dibujado como un rayo en el espacio). Como antes:

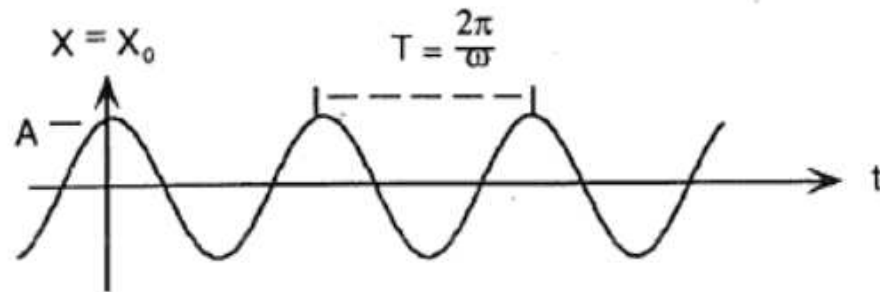
$$\omega = ck$$

pero en tres dimensiones, k es el largo del vector $\bar{k}$, es decir $k = \sqrt{k_x^2 + k_y^2 + k_z^2}$. Nuevamente, en una posición (x, y, z) fija la oscilación del suelo actúa como un sinusoidal en el tiempo a una cierta amplitud. Por último, la oscilación del suelo puede estar una mezcla de frecuencias todos juntos:

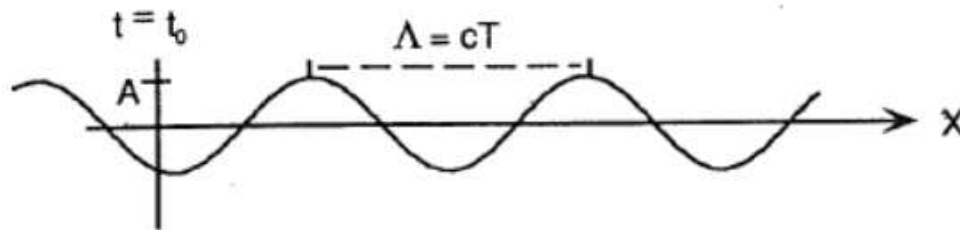
$$u = \int_0^\infty A'(\omega) \sin(k_x x + k_y y + k_z z - \omega t) d\omega$$

Oscilaciones temporo-espacial

At fixed position:



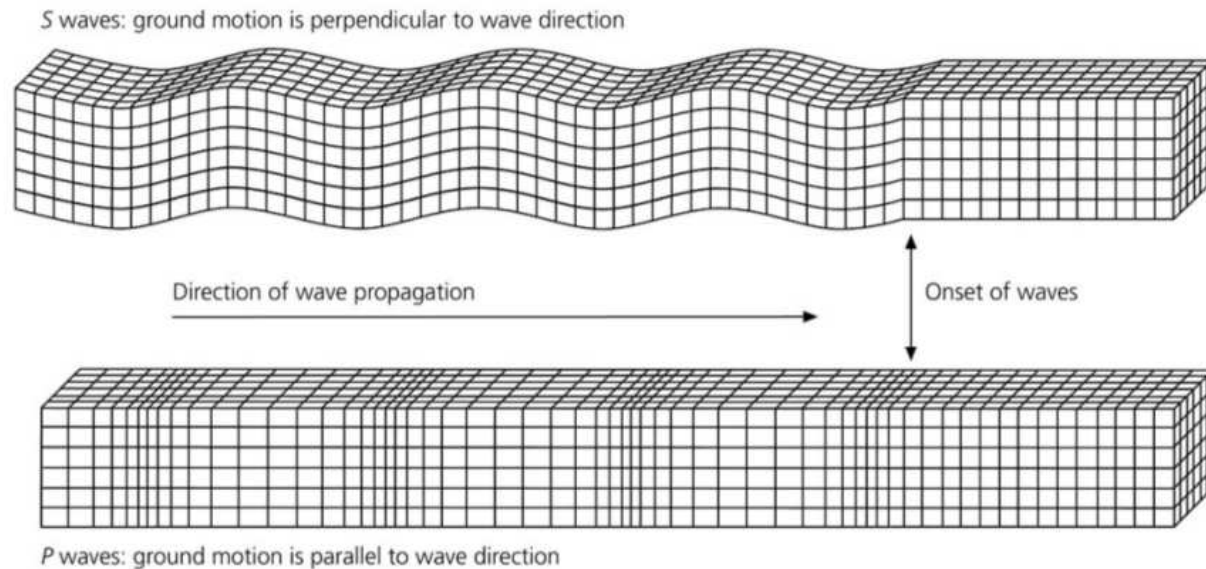
At fixed time:



Propiedades de ondas

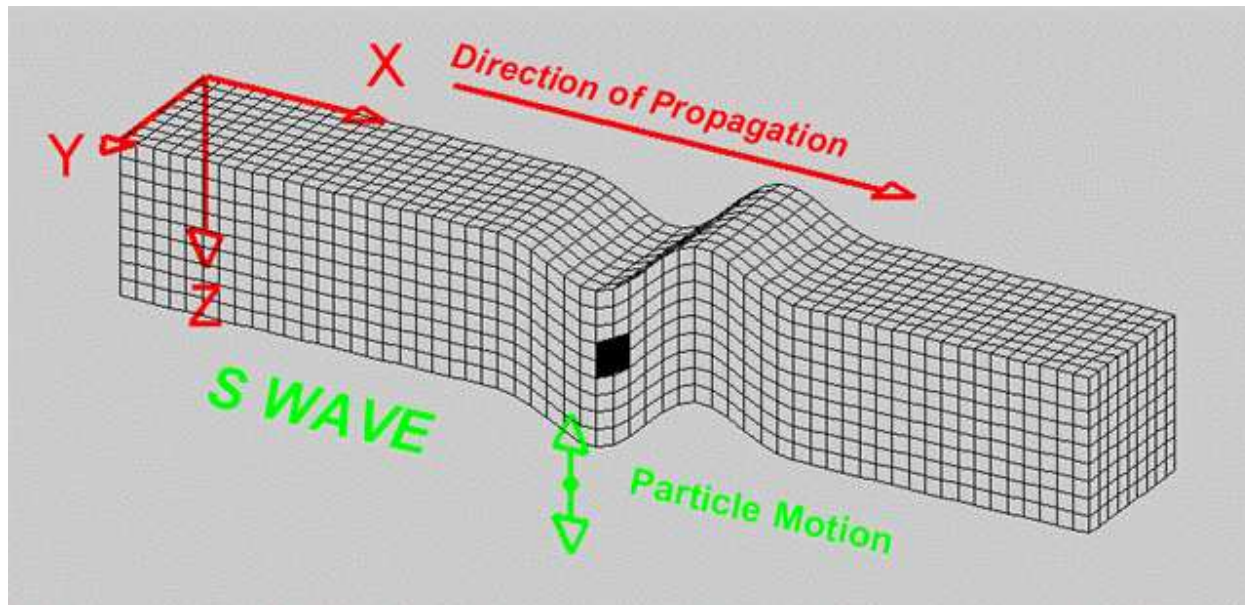
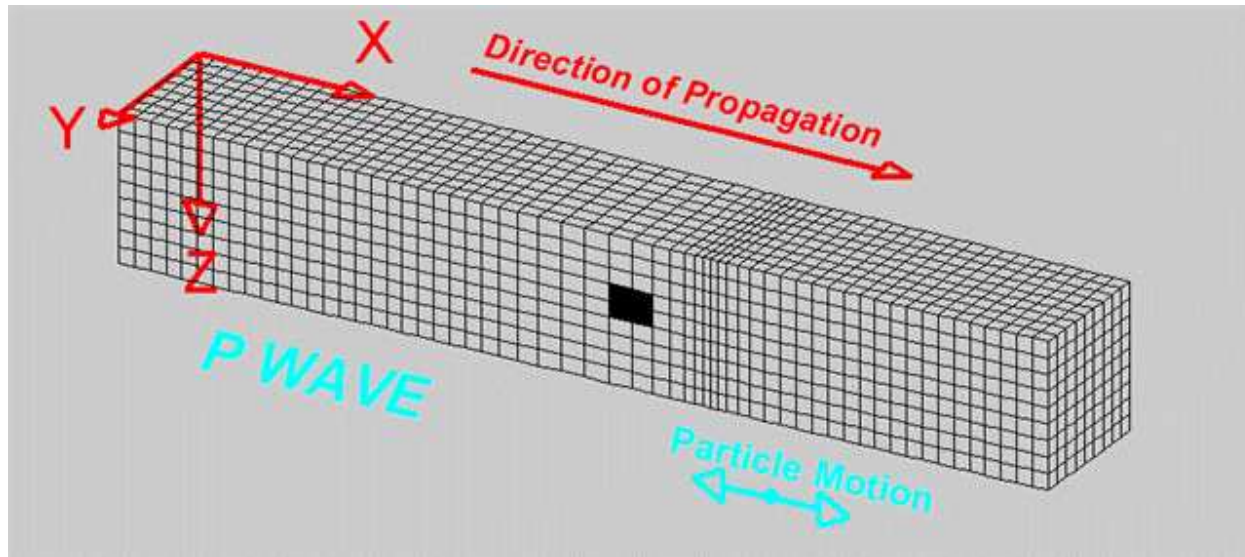
- $\vec{k}$ es el vector de onda - la dirección de propagación de la energía.
- $k = \sqrt{k_x^2 + k_y^2 + k_z^2}$ es el número de onda.
- f es la frecuencia de la oscilación en Hz.
- T es el periodo de la oscilación en segundos ($T = 1/f$).
- ω es la frecuencia angular de la oscilación en radianes por segundo ($\omega = 2\pi f$).
- c es la velocidad de la onda (la velocidad a que se propaga la energía) en m/s (o km/s).
- λ es la longitud de onda en m o km.
- $\omega = ck$.
- $c = f\lambda$.
- $k = 2\pi/\lambda$.

Ondas de cuerpo



- Las ondas S son ondas de cizalle, los elementos del medio no cambian de volumen cuando pasa la onda, solo sufren deformaciones de cizalle.
- Las ondas P son ondas compresionales, los elementos del medio cambian su volumen cuando pasa la onda. Las ondas P son similares a ondas de sonido en el aire.

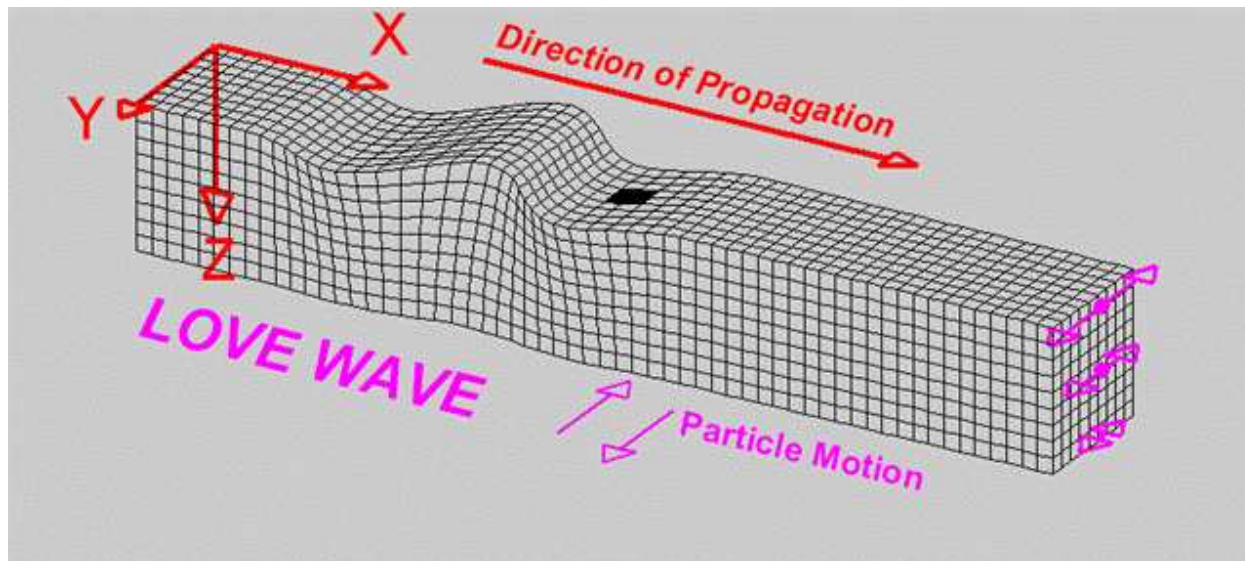
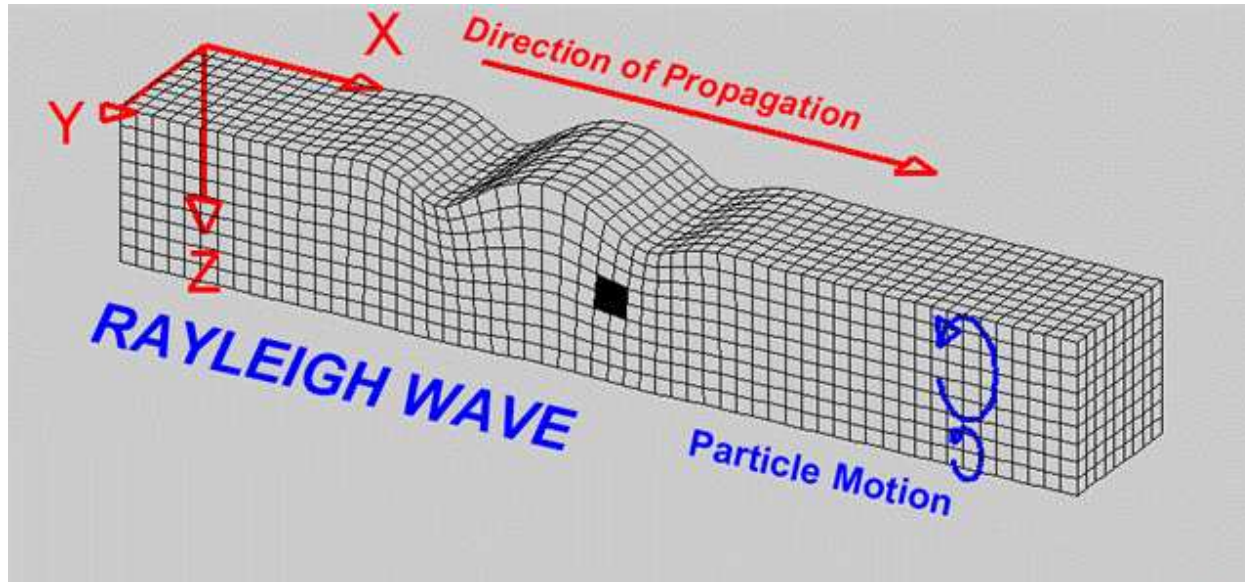
Ondas de cuerpo



Ondas de cuerpo

- Ondas de cuerpo - P y S - son producidos por los terremotos y viajan dentro de la Tierra por sus distintos medios.
- Las ondas de cuerpo se definen por la ecuación $u = A \sin(k_x x + k_y y + k_z z - \omega t)$ con k_x , k_y , k_z números reales.
- El mecanismo de un terremoto, que es un deslizamiento en un plano, introduce deformaciones de ambos compresión y cizalle dentro de la Tierra. Estas deformaciones se van propagando desde la fuente con distintas velocidades.
- La onda P viaja a una velocidad de $\alpha = \sqrt{\frac{\kappa + \frac{4}{3}\mu}{\rho}}$.
- La onda S viaja a una velocidad de $\beta = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$.
- En estas ecuaciones, κ es el modulo de incompresibilidad del material, μ es la rigidez del material, ρ es la densidad de material.
- Noten que la onda P siempre tiene mayor velocidad que la onda S.

Ondas de superficie



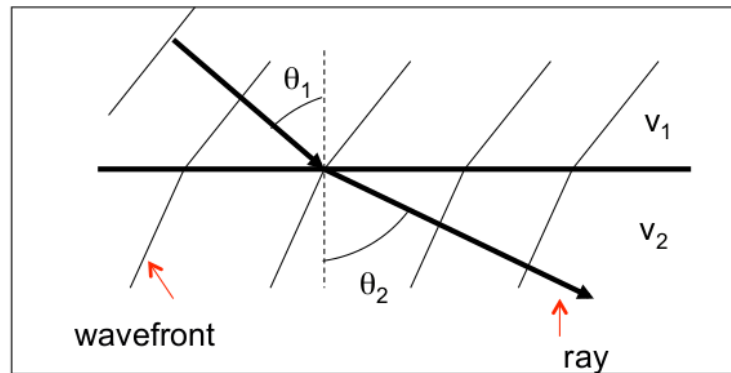
Ondas de superficie

- Las ondas de cuerpo interactúan con la superficie de la Tierra, generando ondas Rayleigh y Love.
- Las ondas de cuerpo se definen por la ecuación $u = A \sin(k_x x + k_y y + k_z z - \omega t)$ pero en esta instancia k_z es un número imaginario y depende de la frecuencia angular!
- Una otra manera de escribir la ecuación oscilatoria es a través de números imaginarios $u = A e^{i(k_x x + k_y y + k_z z - \omega t)}$.
- Entonces, con $k_z = i\eta\omega$, tenemos $u = A e^{i^2 \eta \omega z} e^{i(k_x x + k_y y - \omega t)} = A e^{-\eta \omega z} e^{i(k_x x + k_y y - \omega t)}$.
- Volviendo a la notación sinusoidal, $u = A e^{-\eta \omega z} \sin(k_x x + k_y y - \omega t)$. Esta ecuación representa una onda propagándose en el plano $x - y$, con una amplitud que decae exponencialmente en la dirección de profundidad z .
- El decaimiento de la amplitud con profundidad es distinto para diferentes frecuencias.

Ondas de superficie

- La onda Love representa múltiples rebotes de ondas S en una capa de baja velocidad en de la superficie de la Tierra.
- La onda Love provoca un movimiento del medio transversal a la dirección de propagación de la energía.
- La velocidad de la onda Love es aproximadamente $V_L \simeq \bar{\beta}$, donde $\bar{\beta}$ representa el promedio de la velocidad de la onda S cerca de la superficie, ponderado por la amplitud de la onda de superficie a diferentes profundidades.
- La onda Rayleigh representa una interacción entre las ondas P y S en la superficie de la Tierra.
- La onda Rayleigh provoca un movimiento elíptico en el plano vertical entre el epicentro y el observador.
- La velocidad de la onda Rayleigh es aproximadamente $V_R \simeq 0.9\bar{\beta}$. Esta onda es la más lenta de todas las fases sísmicas.

Ley de Snell

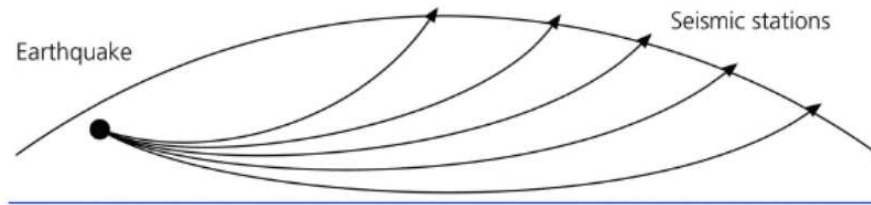


$$v_1 < v_2$$

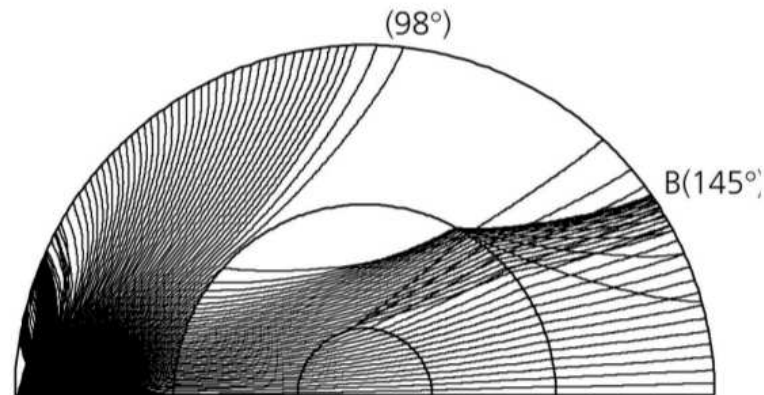
Las ondas siempre toman el camino mas corto (Principio de Fermat). Para minimizar el tiempo de viaje:

$$\frac{\sin \theta_1}{v_1} = \frac{\sin \theta_2}{v_2}$$

Geometría de rayos

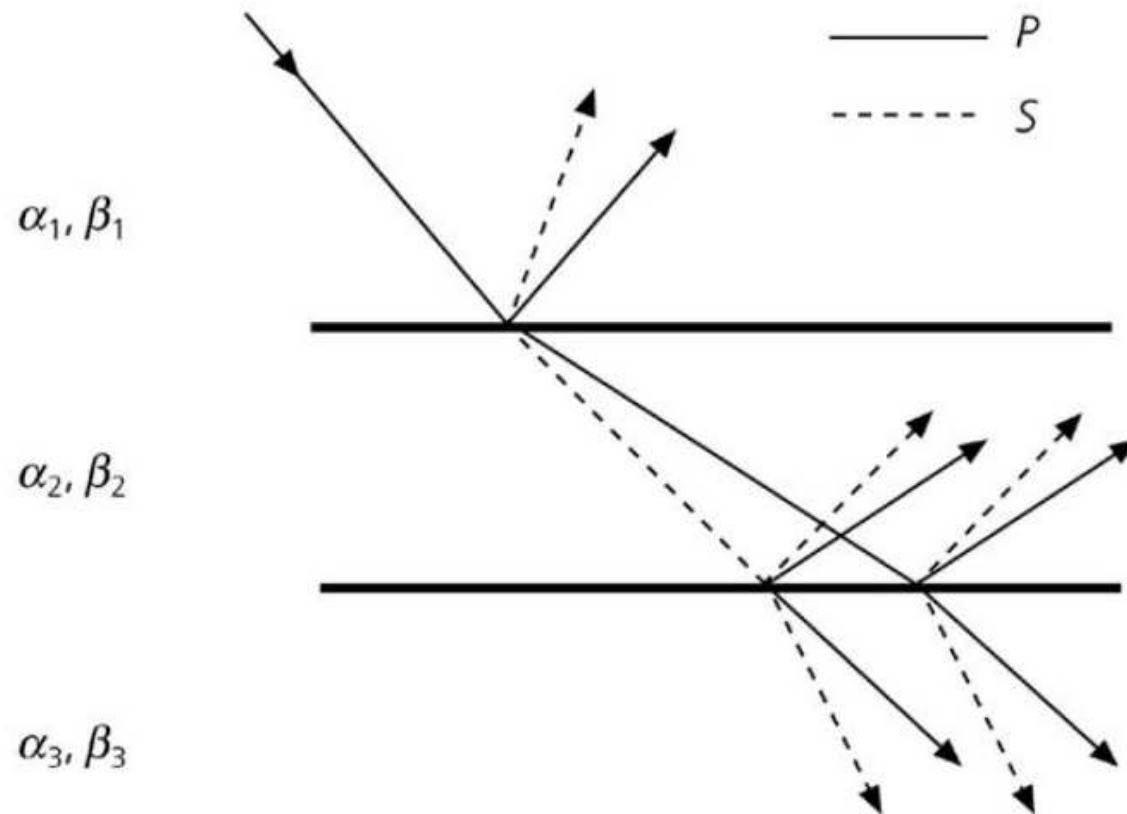


La geometría mostrada es cuando la velocidad sísmica aumenta con la profundidad.



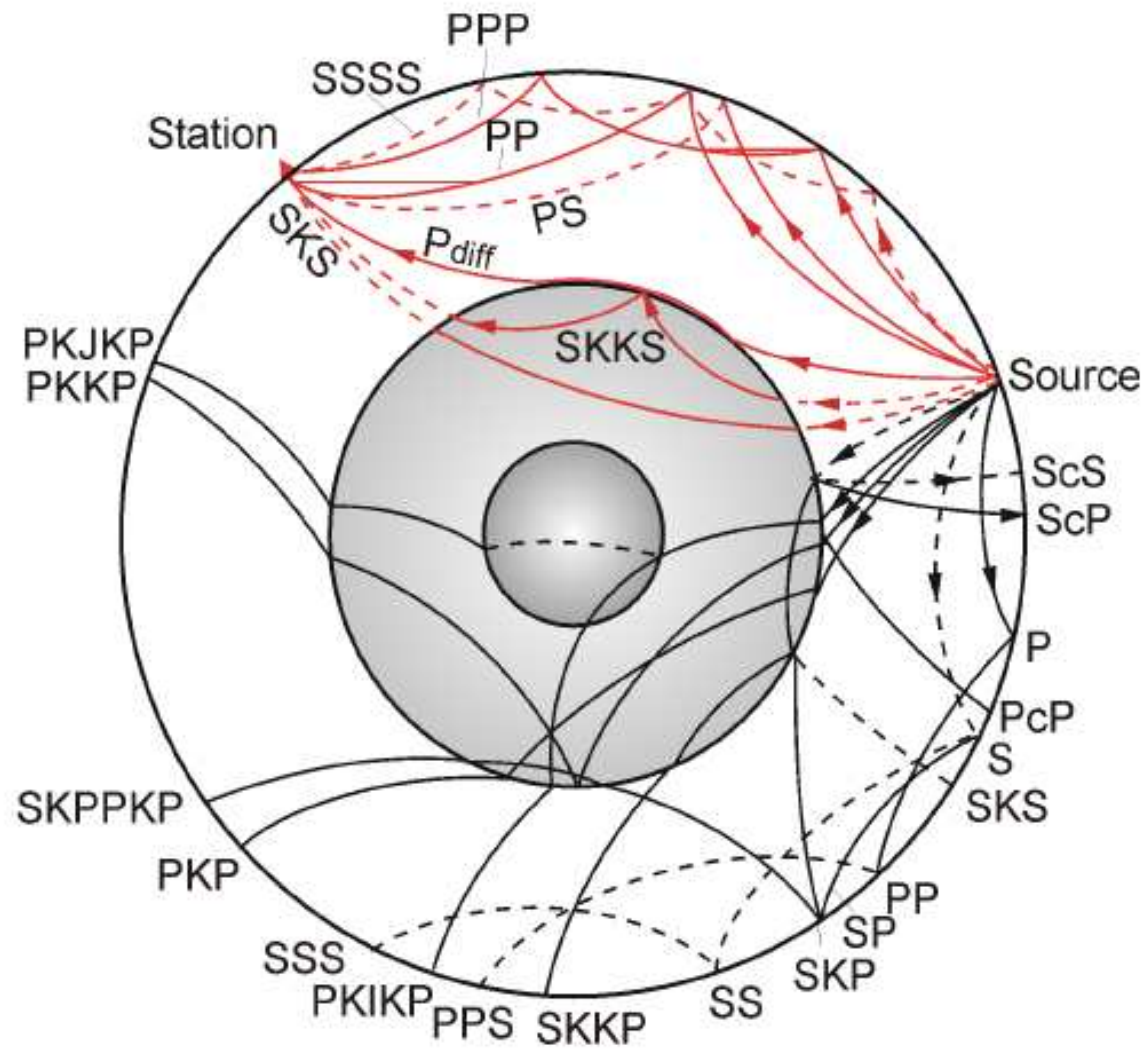
Capas de baja velocidad sísmica generan zonas de sombra.

Conversión P-S



Conversión ocurre en las interfases entre las capas entre las ondas P y S, generando mas fases sísmicas.

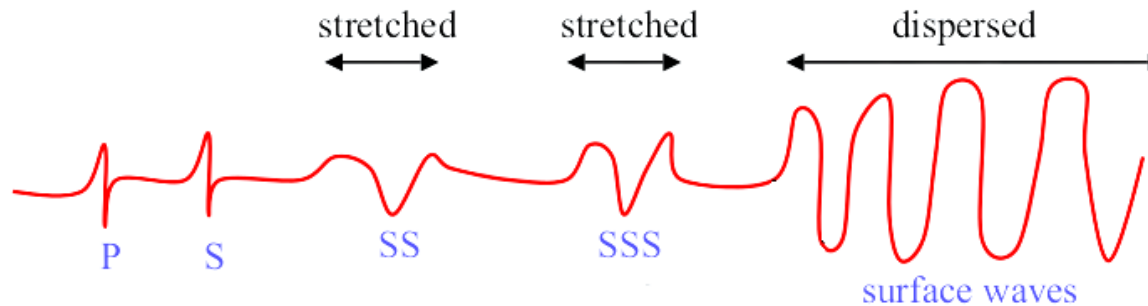
Fases sísmicas



Fases sísmicas

- Letras mayúsculas son usadas para indicar propagación de ondas de cuerpo a través de un medio.
- Letras minúsculas son usadas para indicar reflexiones.
- P - una onda P en el manto.
- S - una onda S en el manto.
- K - una onda P en el núcleo externo.
- I - una onda P en el núcleo interno.
- J - una onda S en el núcleo interno.
- c - una reflexión de la frontera manto-núcleo externo.
- i - una reflexión de la frontera núcleo externo - núcleo interno.

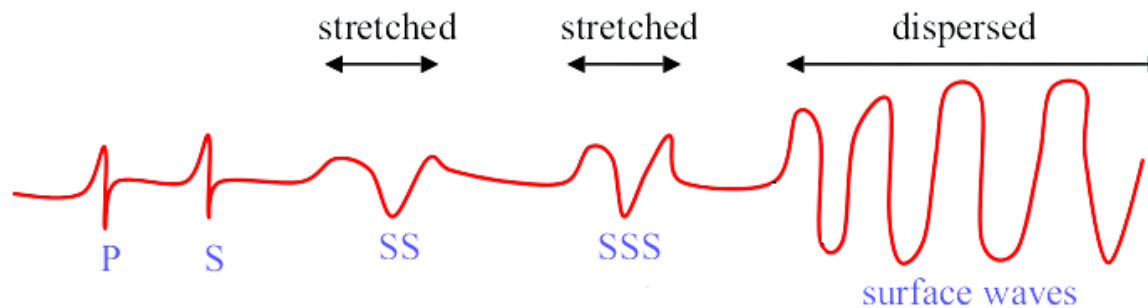
Ondas de cuerpo - atenuación



¿Si uno se siente un terremoto, y las vibraciones están de alta frecuencia, la fuente fue cercana o lejana de ti?

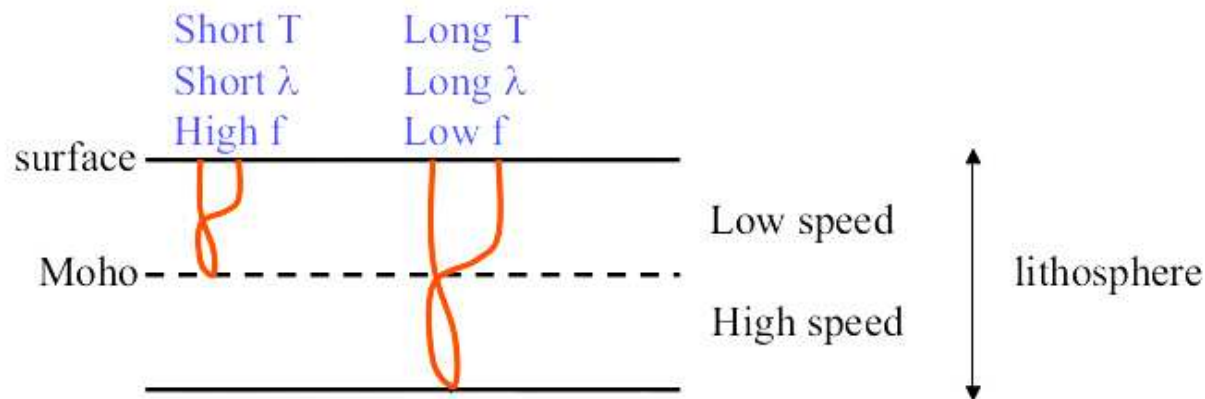
- Atenuación es la pérdida de la parte de alta frecuencia de la señal mientras que pasa el tiempo.
- Más altas frecuencias causan que las fases son "mas claras" en el sismograma.
- Ondas de cuerpo son impulsivos, con corto periodo. Pero llegadas subsecuentes de diferentes fases están estirados en el tiempo - ya perdieron la parte de alta frecuencia de la señal.

Ondas de superficie - dispersión



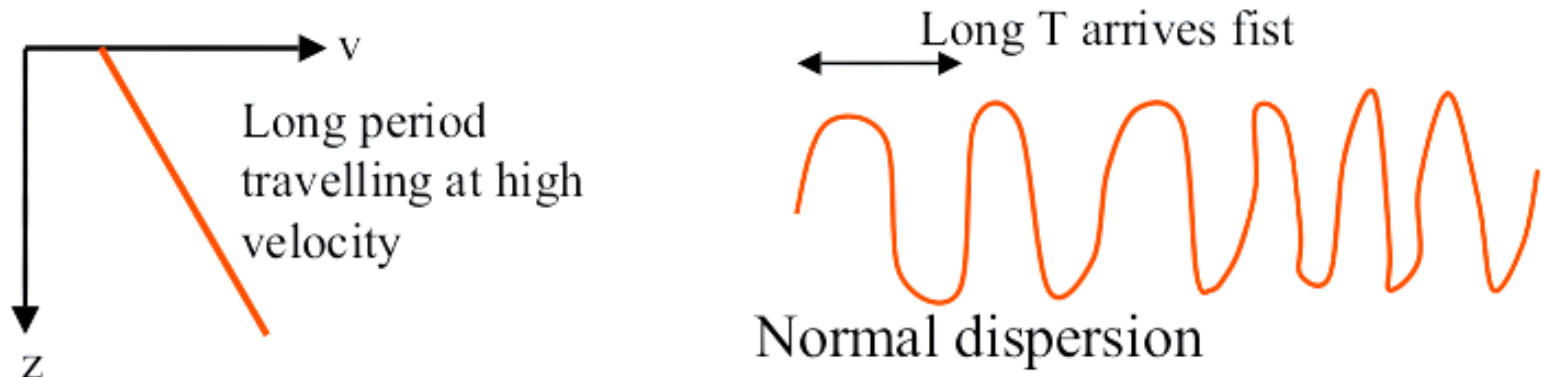
- Dispersión es el efecto cuando diferentes frecuencias de la señal viajan a diferentes velocidades.
- Las ondas de superficie llegan de manera dispersa - las señales pueden durar minutos.
- Para las ondas Rayleigh y Love, las frecuencias más bajas viajan a velocidades mayores.

Ondas de superficie - dispersión



- Recuerden que las velocidades de las ondas de superficie depende de $\bar{\beta}$ - el promedio de la velocidad de la onda S cerca de la superficie, ponderado por la amplitud de la onda de superficie a diferentes profundidades.
- Bajas frecuencias, largos periodos, largos longitudes de onda penetran hasta mayores profundidades - donde β es mayor.
- Entonces los largos periodos viajan a mayor velocidad y llegan primero.
- Las ondas de superficie se penetran a una profundidad aproximada de $\sim \frac{\lambda}{3}$.

Ondas de superficie - dispersión



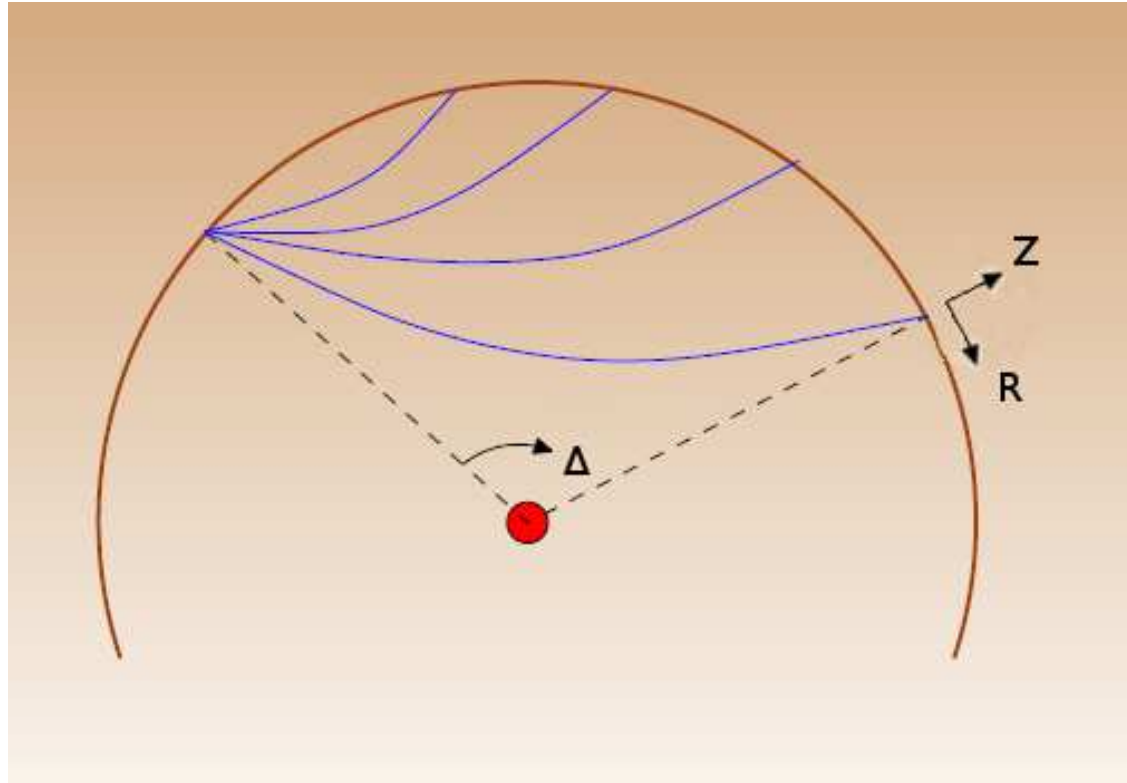
- Si las velocidades sísmicas aumentan con la profundidad dentro de la Tierra, los largos periodos viajan más rápido.
- Entonces en los sismogramas, cuando llegan las ondas de superficie, los largos periodos llegan primero.
- Esto se llama “dispersión normal”.

También, existe la “dispersión inversa” ¿Qué es esa entonces?

Mediciones en sismómetros

- Sismómetros miden la velocidad de la Tierra en 3 dimensiones. Dos componentes son horizontales, y uno es vertical.
- Cuando ocurre un terremoto, diferentes fases sísmicas llegan a diferentes distancias del epicentro, y en diferentes componentes del instrumento.
- Las diferentes fases sísmicas tienen un diferente rango de frecuencias. Ondas de cuerpo en general tienen mayor frecuencia que las ondas de superficie.
- En general, las vibraciones sísmicas con alta frecuencia decaen rápidamente en amplitud con distancia de la fuente (atenuación). Las altas frecuencias se sienten cerca del epicentro, y muy lejos solamente uno siente las frecuencias más bajas.
- Si la señal es suficientemente fuerte, humanos también pueden percibir las oscilaciones.

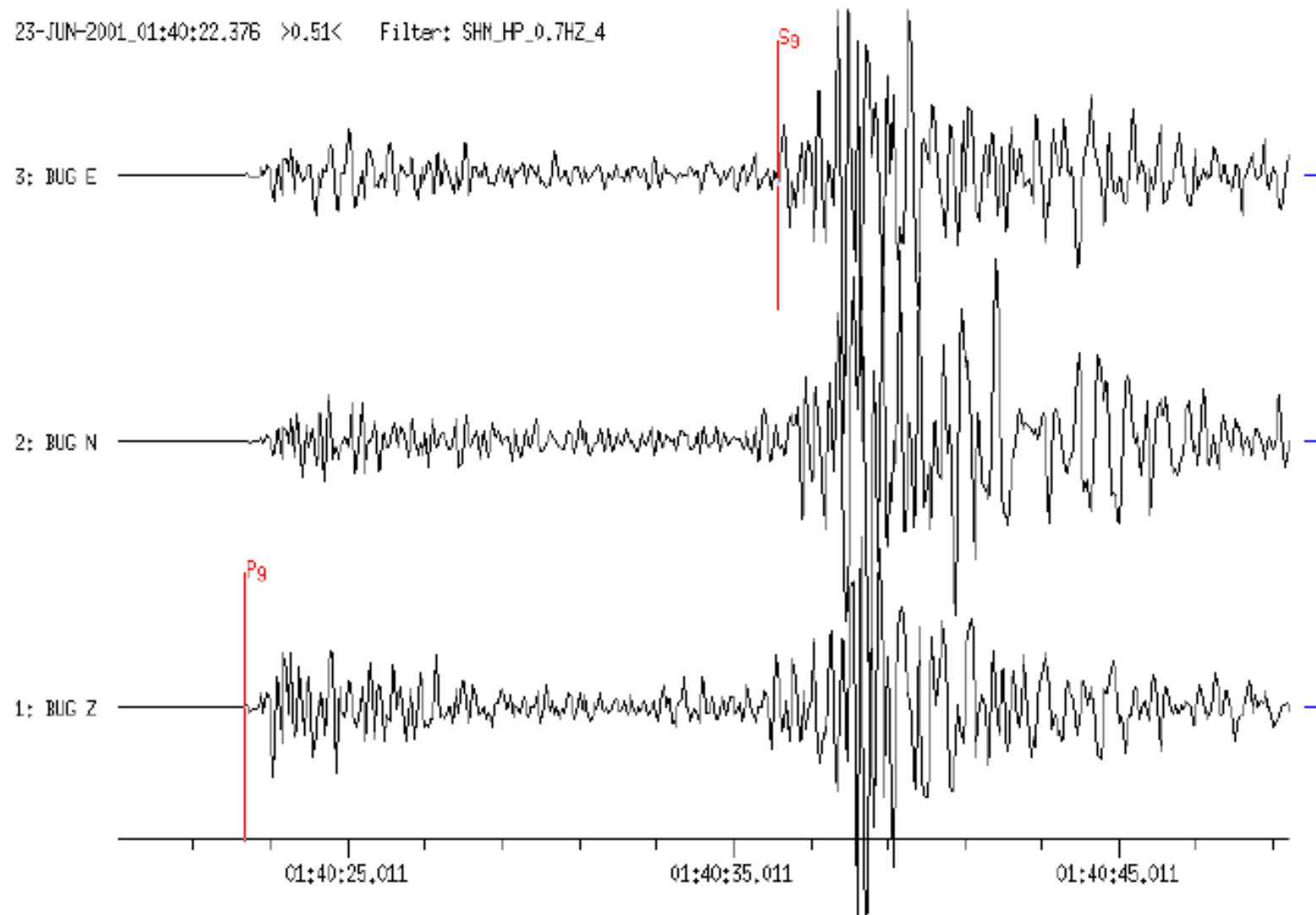
Componentes transversal y radial



Los dos componentes horizontales del sismómetro (comúnmente norte y este) pueden ser rotado hacia las direcciones radial (R) y transversal (T). La dirección radial esta en el plano que atraviesa el centro de la Tierra que contiene la fuente (el terremoto) y el punto de observación (el sismómetro), y entonces los rayos sísmicos. La dirección transversal es perpendicular a este plano. El otro componente apunta en la dirección vertical (Z).

Evento local

23-JUN-2001_01:40:22.376 >0.51< Filter: SHM_HP_0.7HZ_4

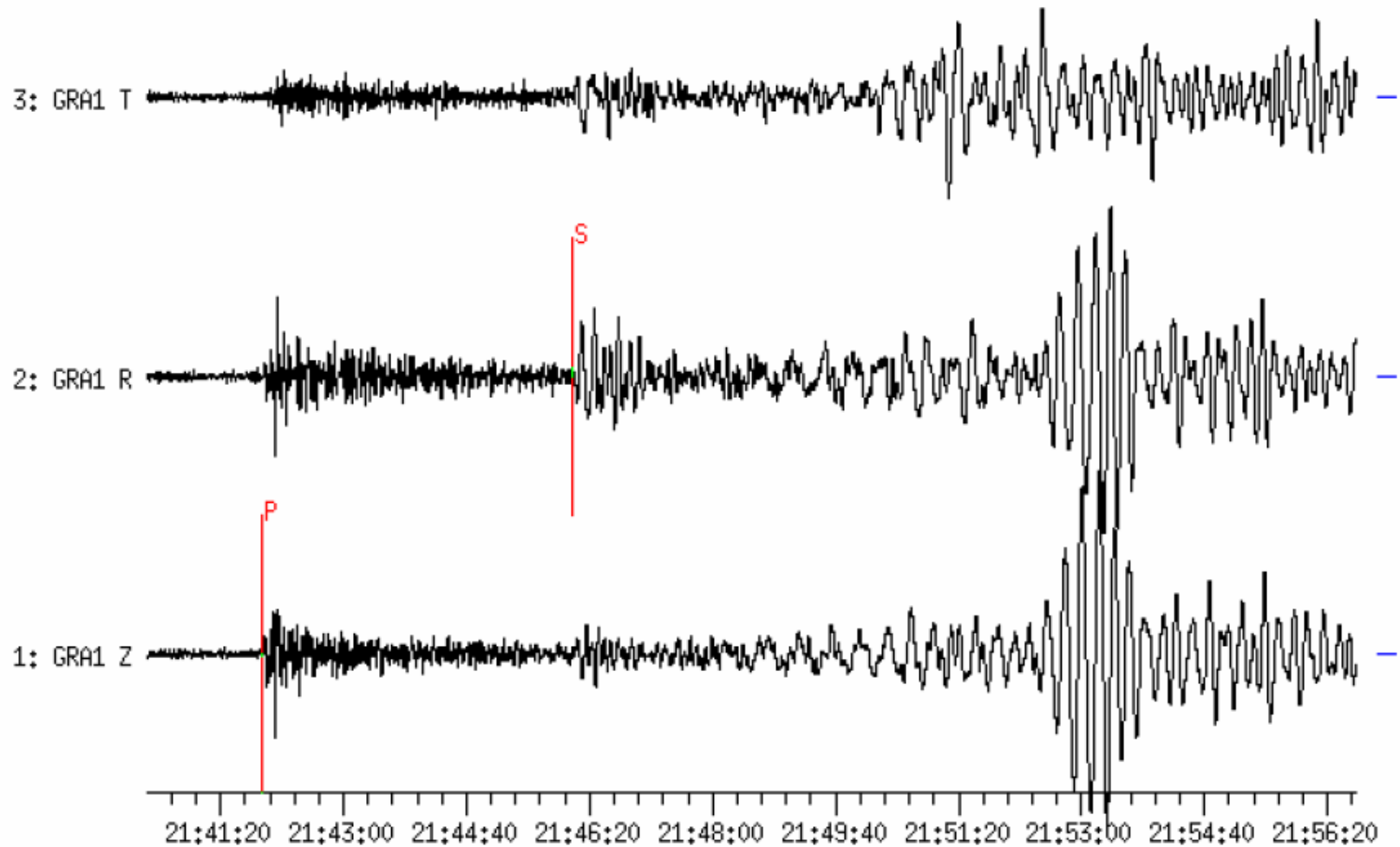


Evento local

- El imagen muestra un sismo local (distancia entre la fuente y la estación de $\sim 1^\circ$ o 111 km). El sismo es baja magnitud (menor que 4).
- Las ondas P y S generadas por el terremoto viajan por la corteza.
- El tiempo S-P es alrededor de 10 segundos por esta distancia.
- La onda P esta más pronunciada en el componente vertical. La onda S esta más pronunciada en los componentes horizontales.
- La onda P esta a una frecuencia un poco mayor que la onda S.

Evento telesísmico

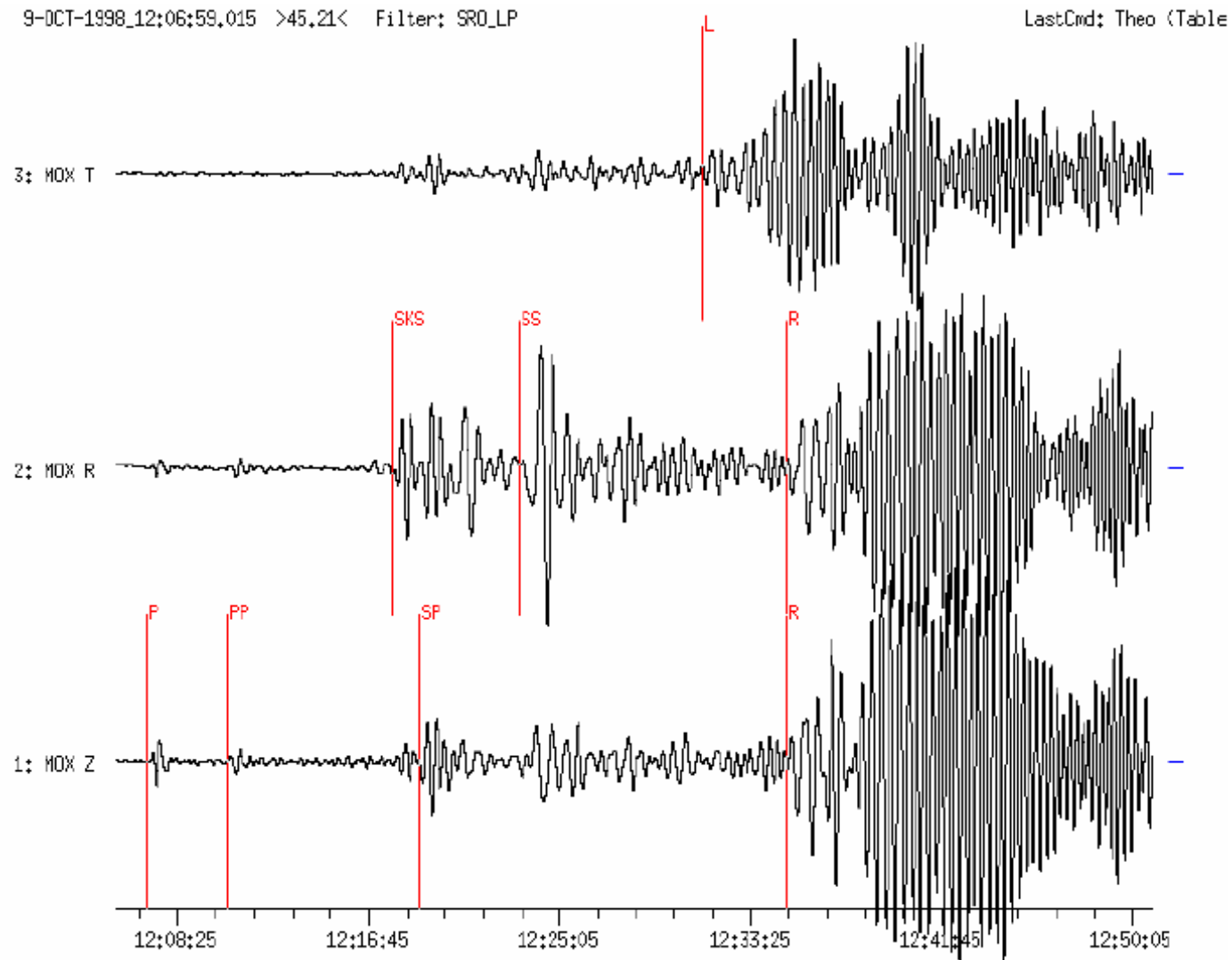
4-JUN-1998_21:42:18.746 >16.37< Filter: None



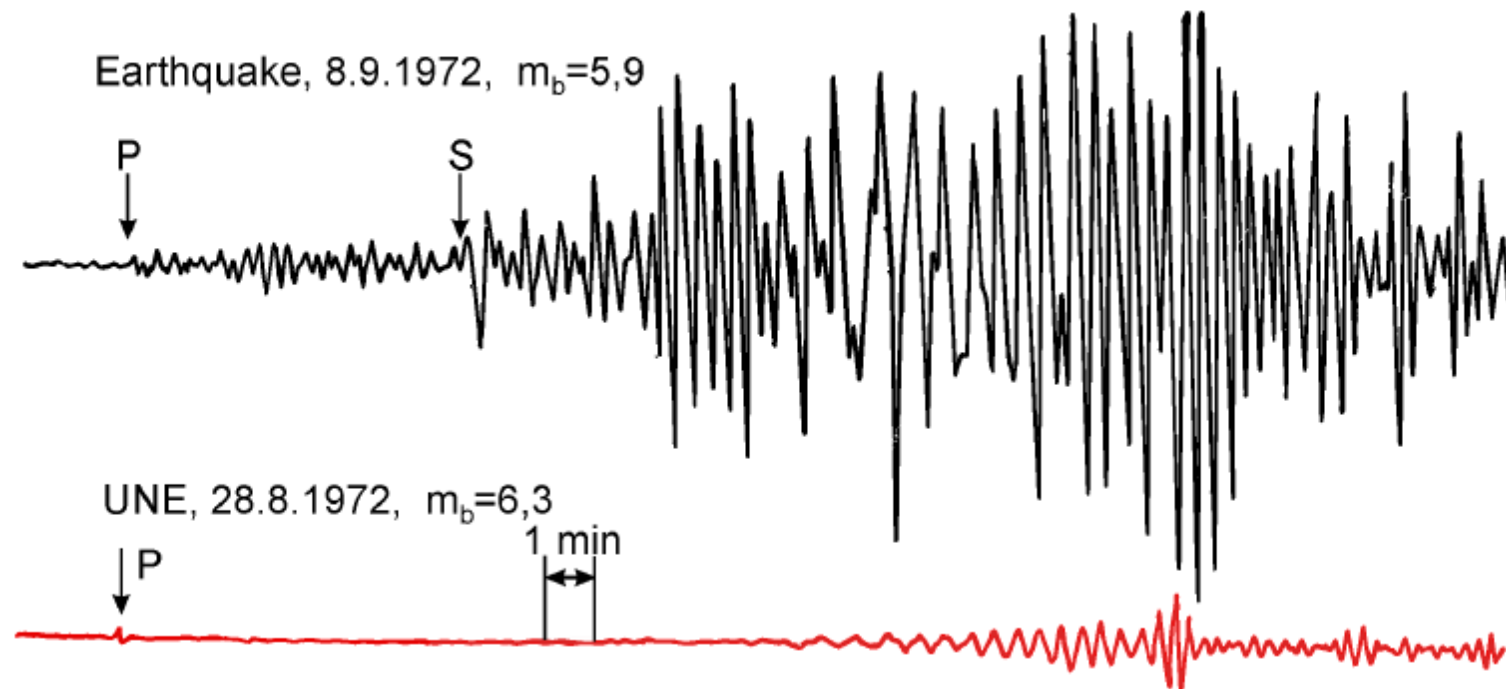
Evento telesísmico

- Eventos telesísmicos empiecen a mostrar más fases sísmicos debido a rebotes dentro de la Tierra y la interacción de las ondas P y S con la superficie de la Tierra.
- Desde $\sim 15^\circ$ se empiecen notar las ondas de superficie.
- El sismograma en la diapositiva anterior esta a una distancia de $\sim 22^\circ$, las fases perceptibles están la P, S, y las ondas de superficie. Noten que este sismograma tiene sus componentes horizontales rotados al radial y transversal.
- Se puede notar la onda Rayleigh en los componentes radial y vertical. La onda Love aparece en el componente transversal un poco antes.
- El registro siguiente, en la próxima diapositiva, muestre más fases porque la distancia entre el terremoto y la estación esta mayor ($\sim 90^\circ$). Noten que la energía SKS llega mayormente en el componente radial (¿por que?).

Evento telesísmico

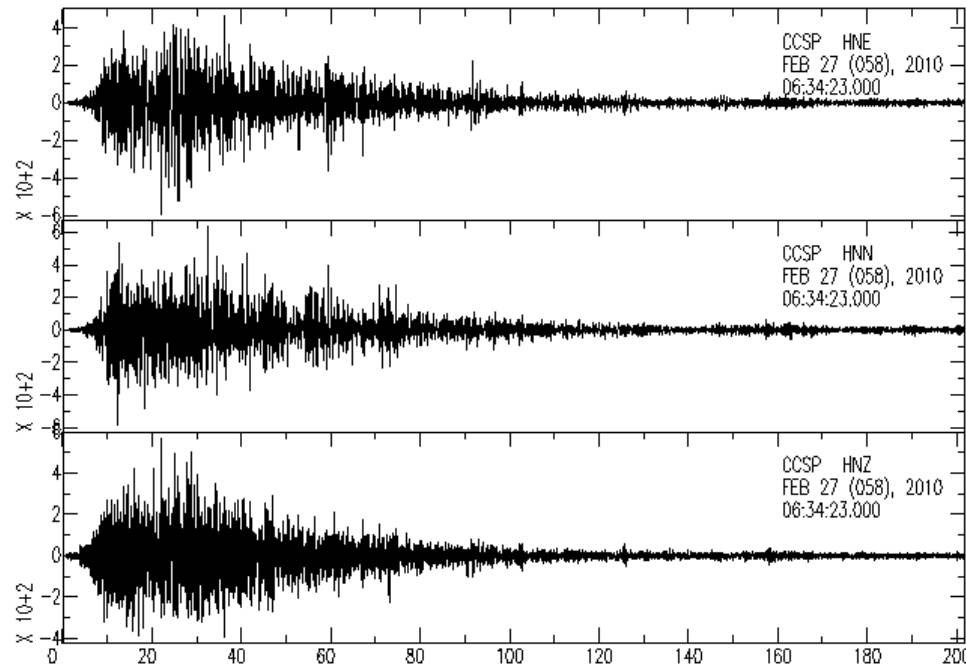


Una explosión nuclear



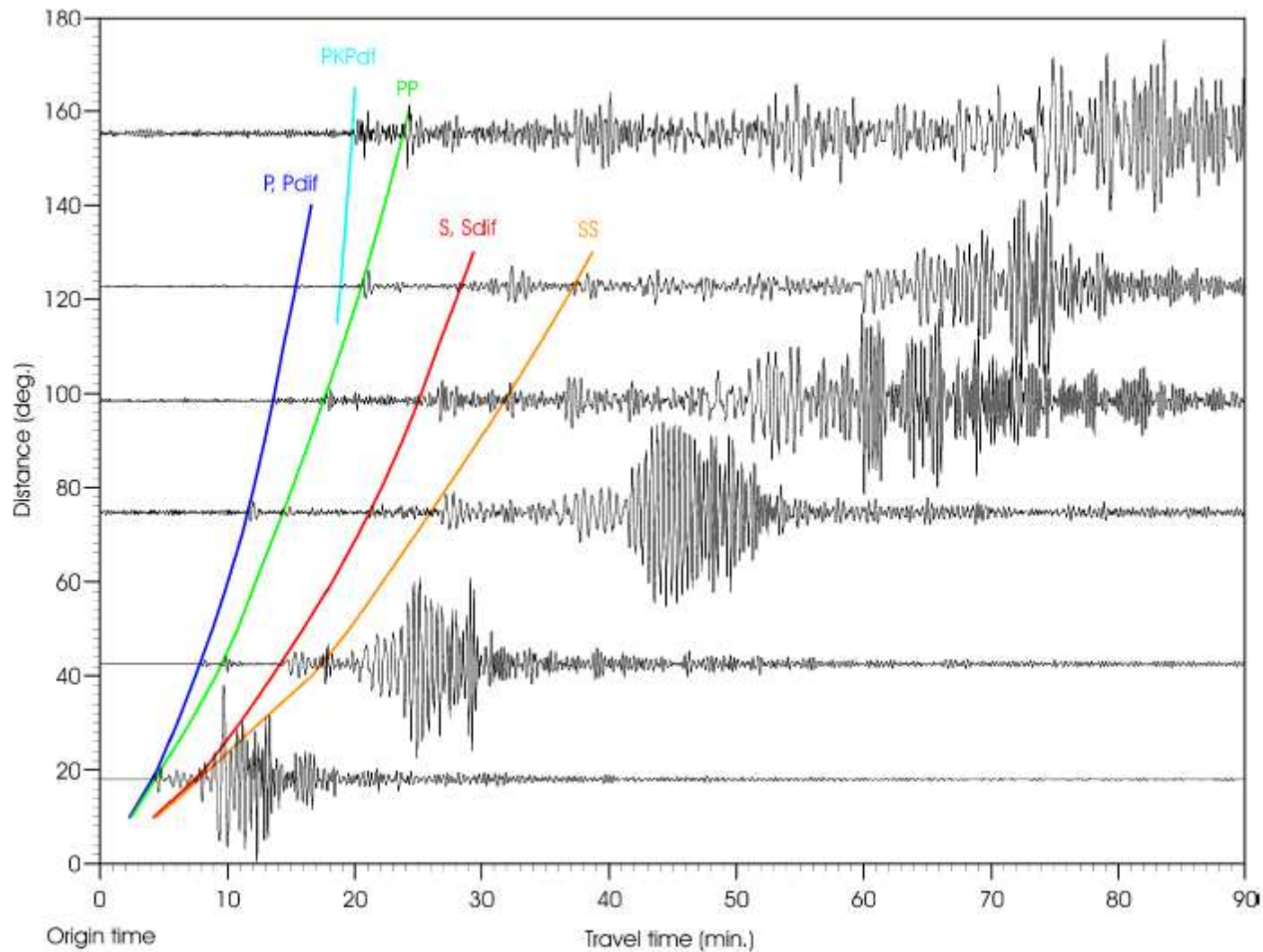
- La figura compara los sismogramas (componente Z) de un terremoto y de una explosión nuclear (UNE). Tienen una magnitud y distancia evento-estación similar ($\sim 40^\circ$).

Megaterremotos



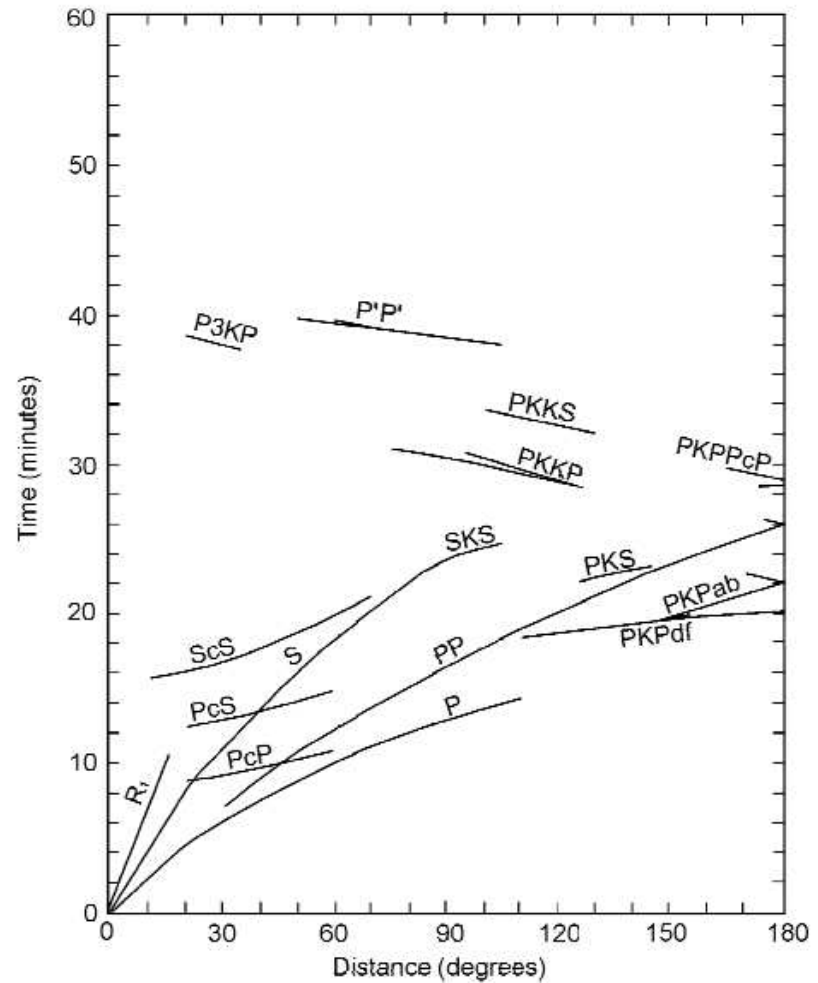
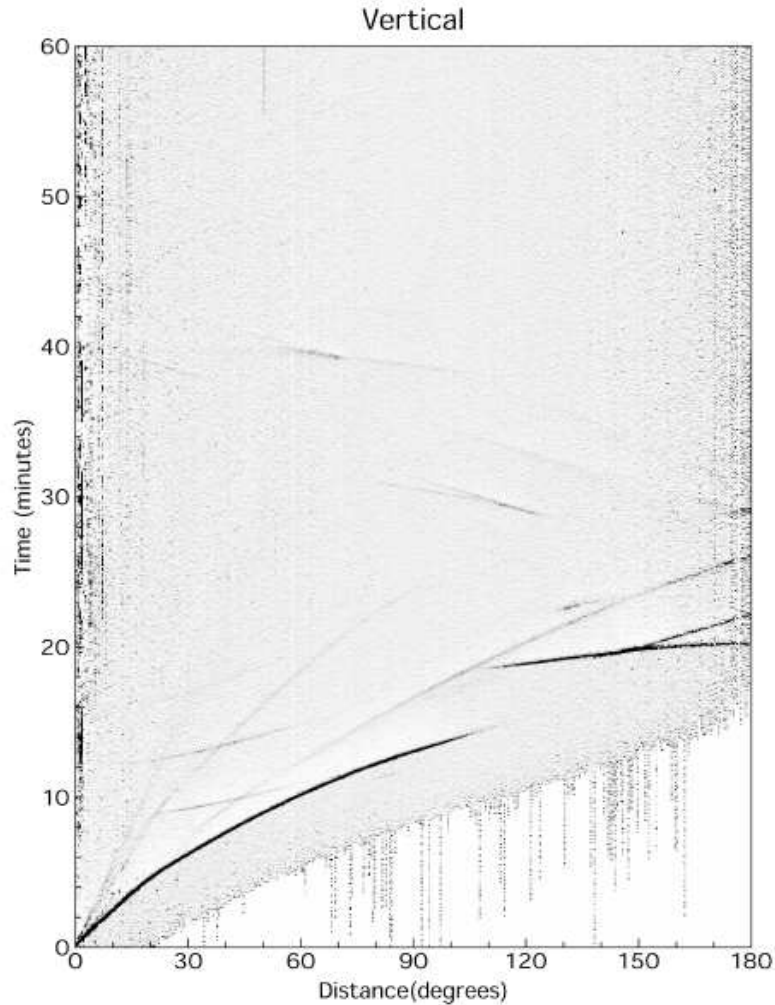
- Cuando el tamaño de la ruptura esta alrededor de la distancia evento-estación, y la ruptura demora minutos para propagarse a lo largo de la falla, los sismogramas locales son una mezcla de registros de ondas P y S de diferentes regiones de la falla, y sus multiples rebotes en capas sedimentarias cerca la superficie de la Tierra, que llegan dentro de unos minutos.

Curvas de tiempo de viaje



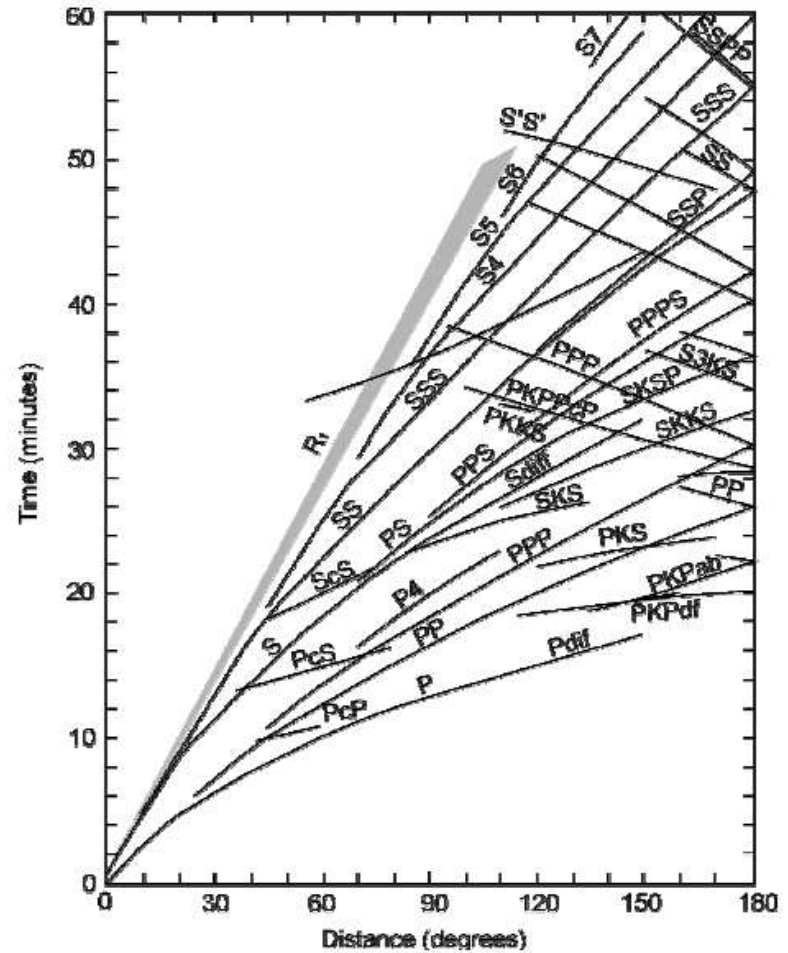
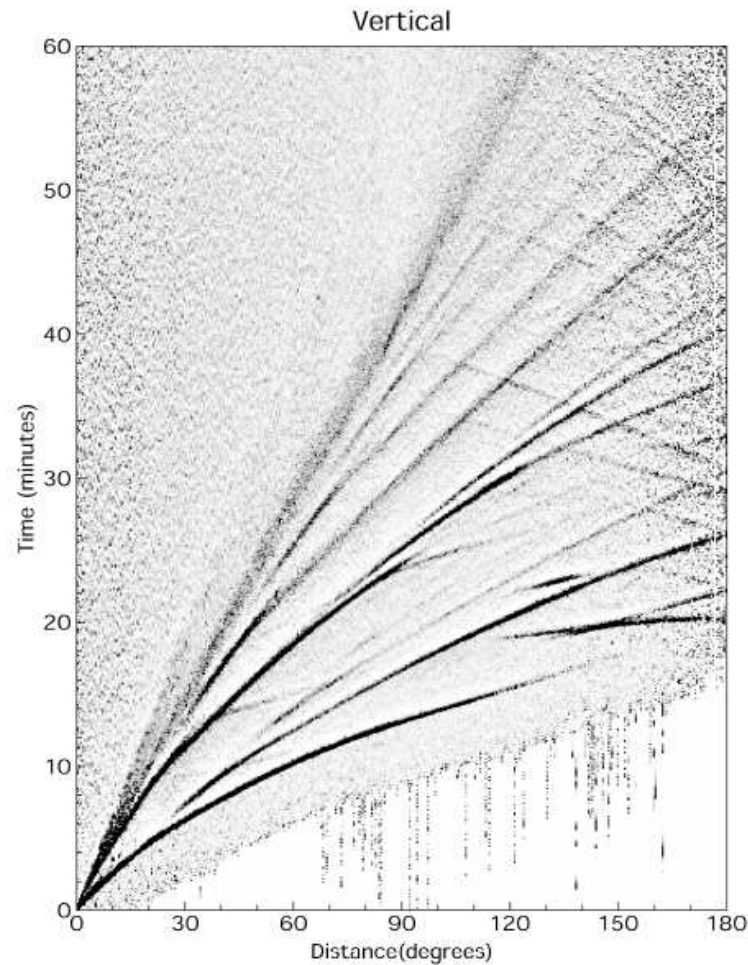
Curvas de tiempo de viaje

Periodo corto, componente vertical.



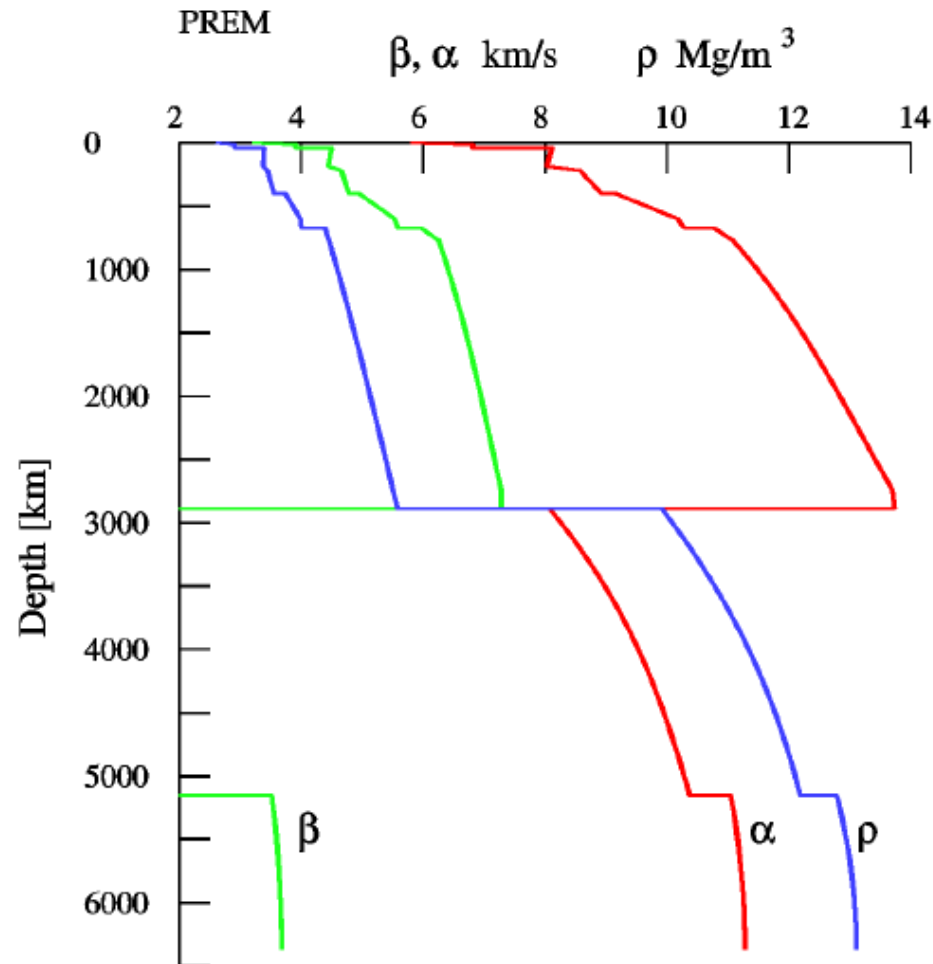
Curvas de tiempo de viaje

Periodo largo, componente vertical.



Curvas de tiempo de viaje

Las observaciones de los tiempos de viaje de las diferentes ondas que viajan dentro de la Tierra nos dan modelos de velocidades para la Tierra.



Preguntas Pendientes ...

1. ¿Cómo se definen físicamente κ , μ y ρ ? ¿Qué unidades tienen?
2. Una buena aproximación es la Tierra es que $\kappa = \frac{5}{3}\mu$. En este caso, ¿cuál es la tasa entre α y β , las velocidades de las ondas P y S?
3. Una primera aproximación para la velocidad de la onda P en la corteza continental superior es $\alpha \simeq 5.5$ km/s. Use su respuesta a la pregunta anterior entonces para estimar la velocidad de la onda S en la corteza continental.
4. Entonces, para un terremoto local, ¿cada segundo de diferencia entre la llegada de la onda P y de la onda S significa que distancia entre la estación y la fuente?
5. ¿Por qué las velocidades de las ondas α y β aumentan dentro de la Tierra, mientras que la densidad también aumenta?
6. Una onda de superficie tiene una velocidad de aprox. 3 km/s. En la superficie su amplitud es 10 cm. ¿Cuál es su amplitud de movimiento a una profundidad de $\frac{\lambda}{3}$? (Un valor aproximado para η es $\eta \simeq 5 \times 10^{-4}$ s/m).

Preguntas Pendientes ...

7. Una onda Love requiere una capa de baja velocidad superficial para atrapar la energía. De ejemplos de posibles capas de baja velocidad encima de la superficie de la Tierra.
8. ¿Por qué no existe una letra para denominar una onda S en el núcleo externo?
9. Dibuje las conversiones entre las ondas P y S de la diapositiva 14, pero esta vez supone que el segundo medio es un líquido.
10. Dibuje las siguientes fases sísmicas: PP, SKP, SSKP, PcS, PKiKP, SKJKS, PPKKP.
11. ¿Qué es la diferencia entre la atenuación y la dispersión?
12. Cómo se cambia entre los componentes Norte/Este de un sismómetro y los componentes Radial/Transversal.
13. ¿Por qué la onda P está más pronunciada en el componente vertical?

Preguntas Pendientes ...

14. Identifique las ondas Love y Rayleigh en el sismograma en la diapositiva 25.
15. ¿Por qué una explosión nuclear no produce una onda S clara?
16. Diapositiva 29: ¿Cuál es el valor de la aceleración en la estación CCSP como un % de g?
17. Explique cómo los tiempos de viaje de las fases entrega la estructura interna de la Tierra.
18. Explique el modelo PREM en la diapositiva 33, especialmente por qué existen las discontinuidades a diferentes profundidades.