

Lección 5: Propagación de ondas en líquidos

Resumen

Los fluidos se caracterizan por el hecho de que casi no ofrecen resistencia a un cambio de forma, pero sí una resistencia muy alta a un cambio de volumen. Para la propagación en el agua hay tres formas. Así, se pueden observar una multitud de fenómenos. No todos ellos se entienden científicamente, por lo que todavía es importante investigar las causas y las consecuencias.

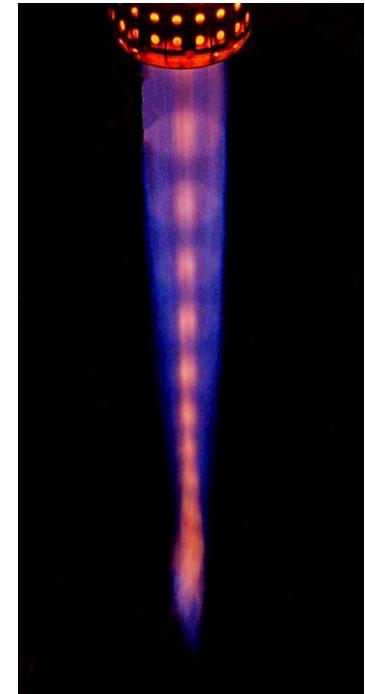
Tabla de contenidos

- Folio 2: Ondas acústicas en líquidos
- Folio 3: La propagación del sonido en el mar
- Folio 4: El sonar abanico
- Folio 5: Ondas acústicas en la profundidad
- Folio 6: El canal de sonido profundo
- Folio 7: Alcance del sonido en el canal de aguas profundas
- Folio 8 – 14: Ondas en la superficie (1-7)
- Folio 15 – 18: El solitón (1-4)
- Folio 19: Los fenómenos de las ondas

Ondas acústicas en líquidos

Al igual que la propagación del sonido en el aire, la propagación del sonido en los líquidos se realiza exclusivamente a través de ondas longitudinales debido a la ausencia de fuerzas de restablecimiento.

En las superficies de los líquidos existen fuerzas de recuperación en forma de la tensión superficial y la fuerza de peso. Esto da lugar a numerosos fenómenos ondulatorios. Sólo en los sólidos se producen ondas longitudinales y transversales debido a la presencia de fuerzas de tensión elástica. La superposición de ondas del mismo tipo que se propagan en sentido contrario da lugar a ondas estacionarias. Estos muestran nodos y antinodos de oscilación, que es una característica común de todas las ondas. Las ondas estacionarias también existen en formas bidimensionales y tridimensionales, como se ve en la llama de retroceso de un motor de cohete. Las características especiales y sus apariciones se tratan en los siguientes capítulos y lecciones.



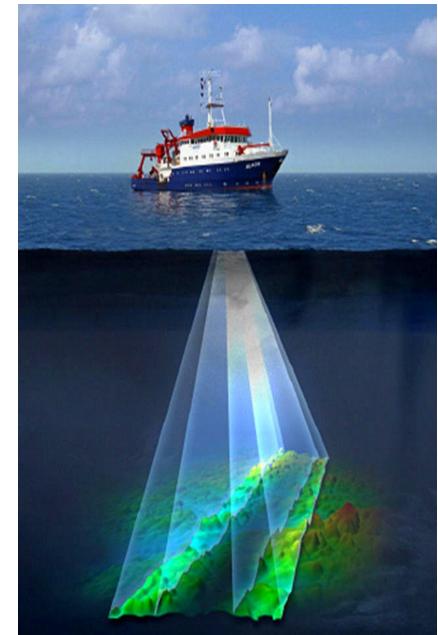
La propagación del sonido en el mar

La temperatura, la presión y la salinidad determinan la velocidad de propagación del sonido en el mar. Para muchos aspectos se puede considerar una velocidad promedio del sonido en el agua.

$$c_{\text{agua de mar}} = 1480 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

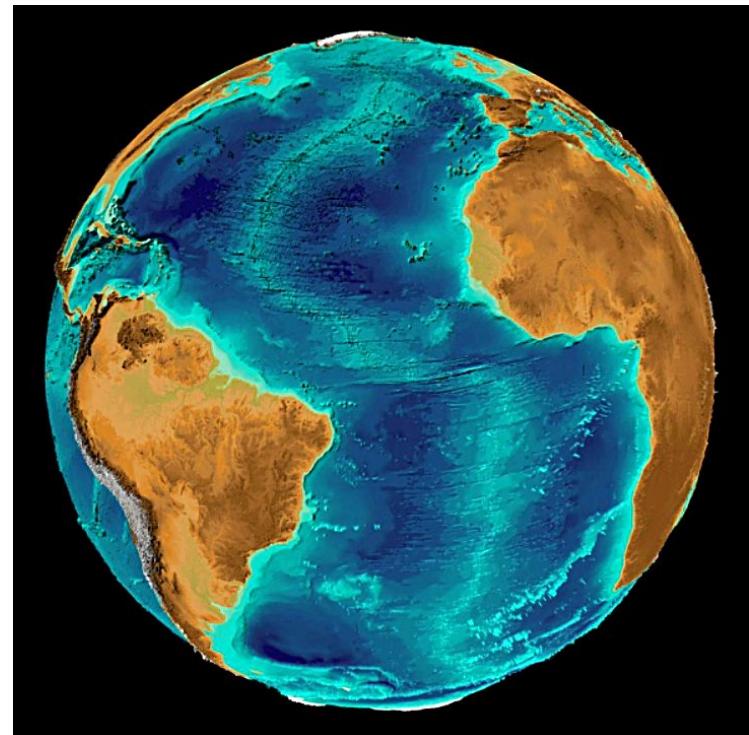
$$c_{\text{agua dulce}} = 1450 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Se utiliza una ecosonda para medir la profundidad del agua. Esto se basa en el mismo principio mencionado en el capítulo anterior del murciélagos. Por la atenuación del sonido a frecuencias más altas, se utilizan frecuencias en el rango de 10-50 kHz. La duración de un pulso emitido es de aproximadamente 1 ms. La secuencia de los pulsos, dependiendo de la profundidad del agua, es alrededor de 1 s. Los transductores piezoelectricos sirven como emisor y receptor de la señal. Con un ingenioso diseño de numerosos emisores en la dirección longitudinal de un nave y receptores perpendicular a la dirección del viaje, el lecho marino puede ser escaneado en una forma de abanico.



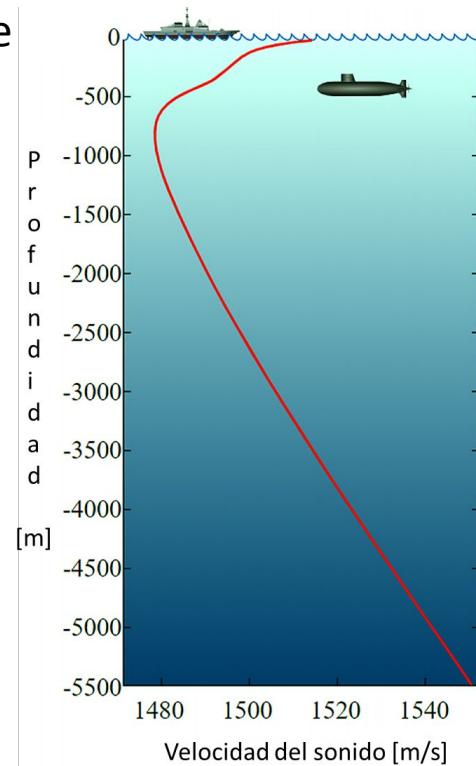
El sonar abanico

En este caso, un grupo de emisores acústicos en la dirección longitudinal genera un haz bien enfocado con $\sim 1.5^\circ$ pero con una gran anchura de hasta 150° transversales a la dirección de desplazamiento. Para la recepción de las señales (ecos), un grupo de receptores se utiliza transversalmente a la dirección del viaje. Estos receptores están interconectados con un retardo de propagación de las señales recibidas de tal manera que un gran número de lóbulos individuales de alta resolución se forman simultáneamente en la dirección transversal. De esta manera, los fondos oceánicos de todo el mundo fueron mapeados. El contorno de las crestas marinas que se hizo visible, llamado rift medio-oceánico, permitió comprender mejor la dinámica de la deriva continental.



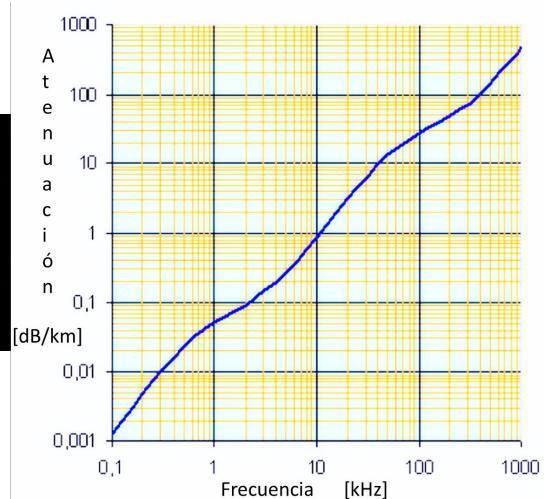
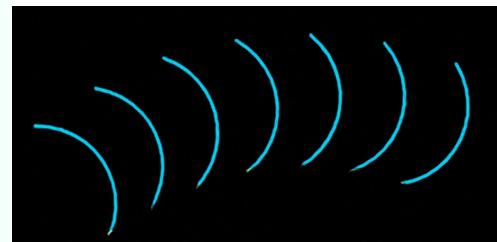
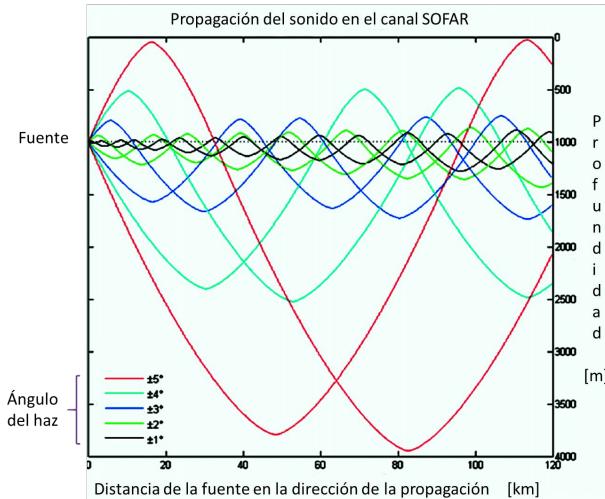
Ondas acústicas en la profundidad

La velocidad aumenta con la profundidad debido a la compresibilidad del agua, aunque es relativamente pequeña. Para agua, no sólo hay una anomalía con respecto a la densidad, sino también para la velocidad del sonido dependiente de la temperatura. La velocidad disminuye desde la superficie con una temperatura de unos 15 grados hasta una cierta profundidad con una temperatura próxima a 4 grados. Sólo a una profundidad de unos 1000 m la temperatura del agua no cambia de manera considerable y la presión de la columna de agua sobre compensa el efecto de la temperatura y la velocidad del sonido aumenta con la profundidad. Por lo tanto, existe una capa relativamente delgada con una velocidad de propagación mínima. Si un haz entra en un medio menos denso, se produce una reflexión total (como en la óptica) dependiendo del ángulo de incidencia.



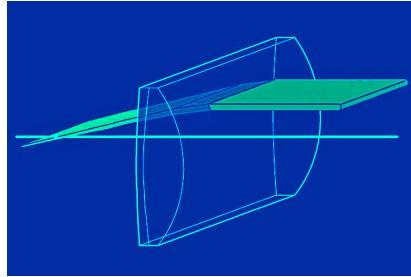
El canal de sonido profundo

Si una fuente de sonido emite directamente en esta delgada capa con una velocidad mínima de sonido, el haz permanece relativamente bien enfocado. Por eso esta delgada capa se llama Canal SOFAR (Sound Fixing And Ranging) o DSC (Deep Sound Channel). La razón del enfoque es que cuando un haz se aleja hacia arriba (o hacia abajo) de esta fina capa, la parte del frente de onda a mayor distancia tiene una mayor velocidad de propagación y por lo tanto se redirigirá de nuevo a la zona de velocidad mínima. Para atravesar grandes distancias es ventajoso utilizar frecuencias bajas con una atenuación despreciable.



Alcance del sonido en el canal de aguas profundas

Otra razón para cruzar largas distancias es la agrupación de ondas en el propio canal SOFAR o DSC, como el paso de la luz a través de una lente cilíndrica. Por lo tanto, la intensidad I del haz de sonido no disminuye proporcionalmente con el cuadrado de la distancia d , sino sólo linealmente. De esta manera, las ondas acústicas avanzan miles de kilómetros a través de las cuencas oceánicas de los fondos marinos.



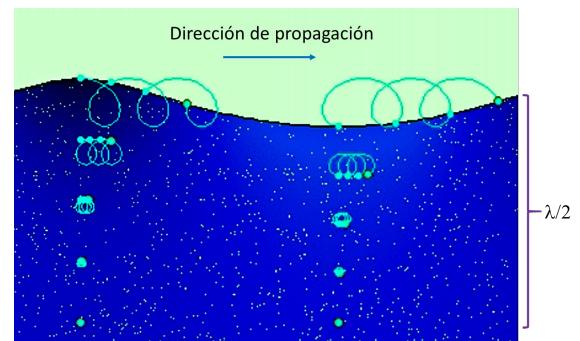
$$I \sim \frac{1}{d}$$



La velocidad de propagación de las ondas de sonido como función de la profundidad se describe con polinomios en una fórmula empírica. En la naturaleza, las ballenas utilizan este canal de comunicación en el buceo profundo, así como en la tecnología para la transmisión de información y la vigilancia mundial de eventos acústicos en los océanos.

Ondas en la superficie (1)

Las aguas y los océanos tienen una superficie libre a la atmósfera. Esto hace que además de la propagación de las ondas sonoras en aguas más profundas, existan ondas en la superficie que son estimuladas por el viento que pasa por encima de ellas. Si observan la superficie con precisión, notarán que la forma de las ondas de la superficie no es sinusoidal. La razón es que cuando el agua es suficiente profunda, las partículas de agua se mueven aproximadamente en trayectorias circulares mientras pasa una ola. Los radios de las órbitas se reducen exponencialmente a cero a una profundidad del orden de la mitad de una longitud de onda. Las ondas de agua muestran la forma de un trocoide. Un trocoide se genera como la trayectoria de un punto cuando este se desplaza sobre o dentro de un círculo (círculo de enganche) mientras se hace rodar un círculo (círculo de lanzamiento).



Ondas en la superficie (2)

Este tipo de propagación de ondas representa una combinación de ondas longitudinales y transversales. La propagación de la onda por 1λ ocurre en el tiempo T por 1 rotación de las partículas de agua en la órbita. La velocidad de propagación es

$$c = \frac{\lambda}{T} = \nu \cdot \lambda$$

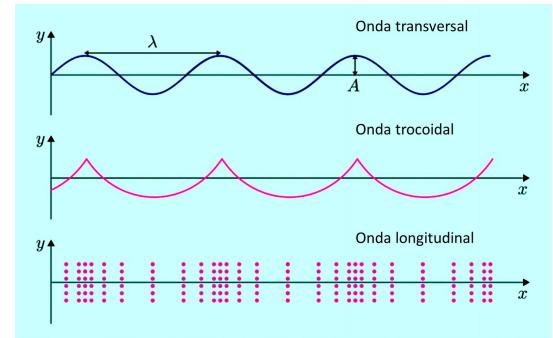
De la teoría de ondas sigue una relación para la velocidad de propagación.

$$c = \sqrt{\frac{g \cdot \lambda}{2\pi} \cdot \tanh\left(\frac{2\pi \cdot P}{\lambda}\right)}$$

Las ondas de superficie se distinguen con respecto a λ y la profundidad P .

Las ondas de agua se llaman ondas de gravedad cuando las partículas de agua realizan el movimiento orbital en su totalidad. La fuerza de restablecimiento es la gravitación.

$$\text{Profundidad } P \text{ del agua} > \frac{\lambda}{2}$$



Ondas en la superficie (3)

Para mayores profundidades de agua vale la aproximación: $\tanh(x) \approx 1$

$$c = \sqrt{\frac{g \cdot \lambda}{2\pi}}$$

Simplificado con el cálculo de las constantes (constante de gravitación: $g = 9.81 \text{ m/s}^2$) se aplica

$$c = 1.25 \cdot \sqrt{\lambda} \quad [\frac{\text{m}}{\text{s}}]$$

La velocidad de propagación de las ondas de gravedad depende de la longitud de onda, es decir, las ondas de gravedad muestran dispersión. Las ondas largas se propagan más rápido que las ondas cortas.

	T	c
1000 m	25 s	142 km/h
100 m	8 s	45 km/h
10 m	2.5 s	14 km/h
1 m	0.8 s	4.5 km/h

Ondas en la superficie (4)

Si el movimiento del agua llega al fondo (lecho marino) estas ondas se llaman ondas de aguas bajas. La condición es:

$$\text{Profundidad } P \text{ del agua} < \frac{\lambda}{20}$$

En este caso se aplica la siguiente aproximación: $\tanh(x) \approx x$

$$c = \sqrt{g \cdot P}$$

Como una fórmula numérica se obtiene

$$c = 3.13 \cdot \sqrt{P} \quad \left[\frac{m}{s} \right]$$

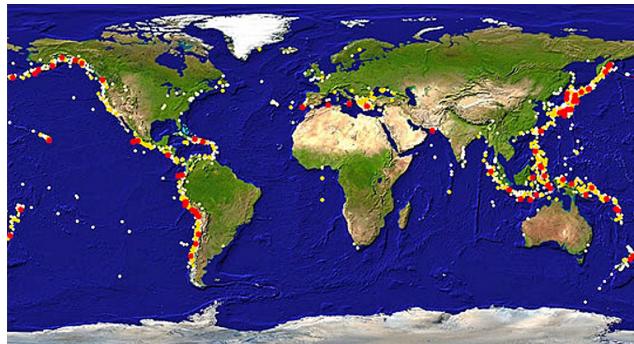
La velocidad de propagación es independiente de la longitud de onda, es decir, las ondas de aguas bajas no tienen dispersión. Los maremotos o los deslizamientos submarinos pueden desencadenar tsunamis.



Ondas en la superficie (5)

Los tsunamis aparecen durante su propagación sobre las profundidades del mar con una cresta menor de 1 m de altura con una longitud de onda de unos 100 km. Como la velocidad de propagación depende sólo de la profundidad, alcanzan los 800 km/h. Cerca de la playa corren hacia arriba y vuelcan, ya que la cresta de la ola tiene una mayor velocidad de propagación debido a la mayor profundidad del agua. Debido a la falta de dispersión, toda la energía mecánica se libera en un solo golpe, lo que puede causar enormes daños.

En el mar, algunos máximos de olas de gravedad pueden superponerse por interferencia constructiva. Estos fenómenos individuales alcanzan una altura hasta los 30 m y se llaman ondas gigantes.



Mapa mundial de tsunamis

- daño grave
- daño medio
- daño menor
- epizentros



Ondas en la superficie (6)

La longitudes de onda en el rango de centímetros se llaman ondas capilares. Su velocidad de propagación está determinada por la tensión superficial como fuerza de restablecimiento.

$$c = \sqrt{\frac{2\pi \cdot \sigma}{\rho \cdot \lambda}}$$

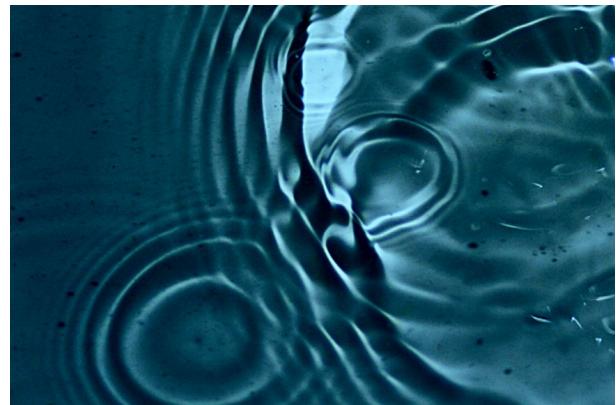
σ : tensión superficial; $\sigma_{H_2O} \approx 0.075 \text{ N/m}$

ρ : densidad; $\rho_{H_2O} = 1000 \text{ kg/m}^3$

La fórmula con las constantes numéricas es:

$$c = 0.02 \cdot \frac{1}{\sqrt{\lambda}} \left[\frac{m}{s} \right]$$

Ejemplo numérico: $c = 20 \frac{\text{cm}}{\text{s}}$ para $\lambda = 1 \text{ cm}$



La dispersión está presente con las ondas capilares. Aquí, sin embargo, es lo opuesto a las ondas de gravedad, es decir, las pequeñas longitudes de onda se propagan más rápido que las grandes.

Ondas en la superficie (7)

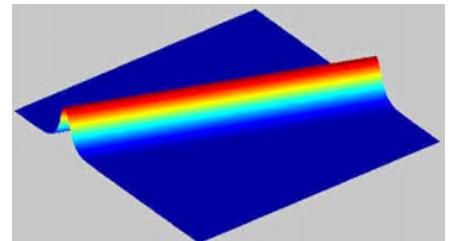
En aguas profundas, la velocidad de propagación de las ondas capilares está determinada por ambos, la tensión superficial y la gravitación.

$$c = \sqrt{\frac{2\pi \cdot \sigma}{\rho \cdot \lambda} + \frac{g \cdot \lambda}{2\pi}}$$

En este caso la dispersión de los términos es opuesta. Como consecuencia, a una cierta longitud de onda la dispersión debe desaparecer. Al calcularlo, se obtiene:

$$\frac{2\pi \cdot \sigma}{\rho \cdot \lambda} = \frac{g \cdot \lambda}{2\pi}$$
$$\lambda = 1.7 \text{ cm} \quad c = 23 \frac{\text{cm}}{\text{s}}$$

Otro fenómeno de ondas es la aparición de un paquete (pulso) cuya forma no cambia y que se propaga con una velocidad constante.



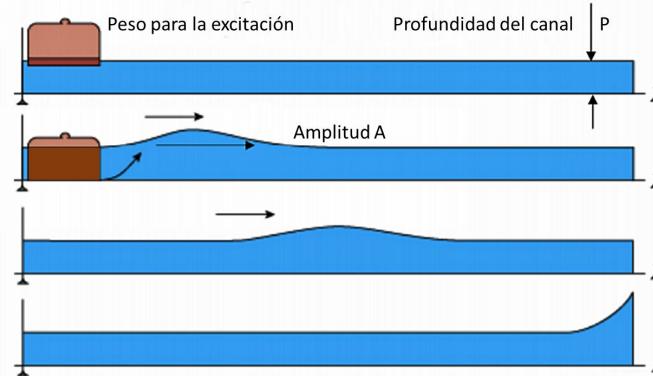
El solitón (1)

Tal paquete de ondas conserva su forma debido a la dispersión del medio y sus propiedades no lineales. Si no hay intercambio de energía al chocar con paquetes de ondas similares, es decir, cada paquete de ondas continúa su camino sin ser perturbado, esto se llama solitón. Los solitones pueden ocurrir en canales, pero también en aguas más profundas. La velocidad de propagación de un solitón en un canal es:

$$c = \sqrt{g \cdot (A + P)}$$

A : Amplitud

P : Profundidad del canal



La profundidad del agua es responsable por la dispersión y el tamaño de la amplitud causa un comportamiento no lineal. El solitón resulta del equilibrio dinámico entre la dispersión y los efectos no lineales. Matemáticamente, el solitón aparece como una solución de ecuaciones diferenciales parciales.

El solitón (2)

Korteweg y de Vries ofrecieron una representación de las ecuaciones diferenciales parciales. Las soluciones de estas ecuaciones son los solitones observados en la naturaleza y la tecnología.

$$u_t + u_{xxx} + u \cdot u_x = 0$$

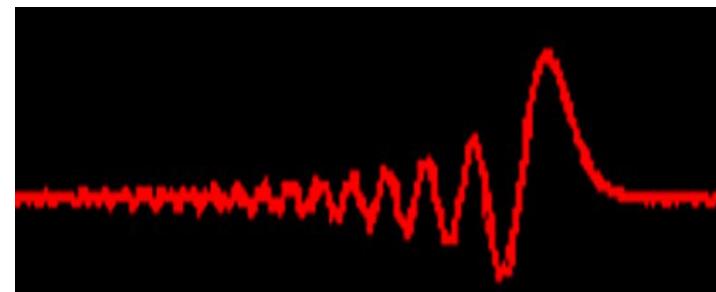
$u = u(x, t)$ representa la altura de la ola por encima del estado de equilibrio al tiempo t y la posición x ; el subíndice indica la diferenciación parcial

u_{xxx} representa la dispersión

$u \cdot u_x$ representa la no linealidad

La solución del término de dispersión muestra la mayor velocidad de propagación para longitudes de onda más largas
(similar a las ondas de gravedad).

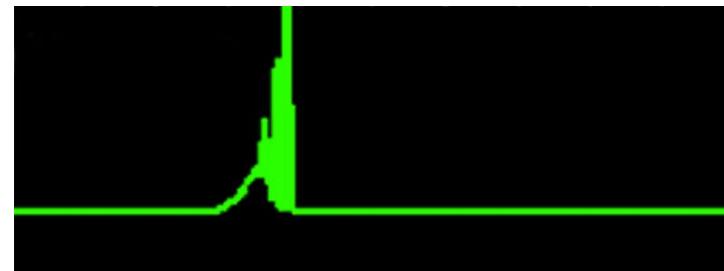
$$u_t + u_{xxx} = 0$$



El solitón (3)

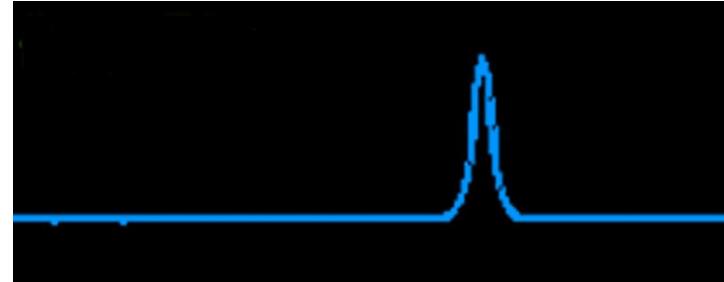
La solución del término no linealidad muestra un aumento de la velocidad para longitudes de onda más cortas (similar a las ondas capilares, pero para éstas la razón es la tensión superficial).

$$u_t + u \cdot u_x = 0$$



Cuando ambos términos, el dispersivo y el no lineal, están presentes en la ecuación, los dos efectos pueden neutralizarse mutuamente. Si la onda de agua tiene una forma especial, los efectos se contrarrestan exactamente y la onda se desplaza sin deformación.

$$u_t + u_{xxx} + u \cdot u_x = 0$$



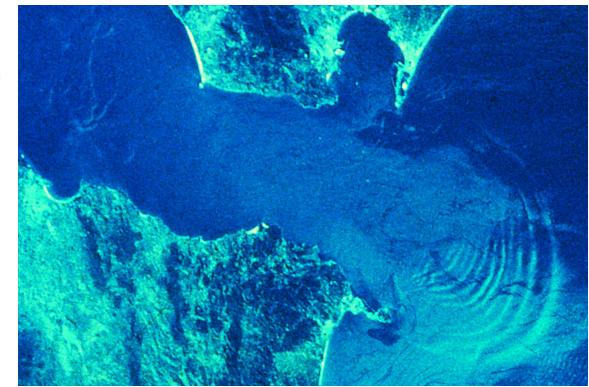
El solitón (4)

La forma del solitón resulta de la integración de la ecuación diferencial parcial; la envoltura es la función trigonométrica cuadrada de la secante hiperbólica.

$$u(x, t) = a \cdot \operatorname{sech}^2\left(\sqrt{\frac{a}{12}} \cdot (x - v \cdot t)\right)$$

La constante a es el único parámetro libre en la fórmula. Define la amplitud y el ancho de tal manera que un solitón alto será estrecho, mientras que un solitón bajo será ancho. La constante v define la velocidad del solitón.

Los solitones también pueden ser observados en el mar y en muchas otras áreas como la meteorología, la óptica y la electrónica. Por ejemplo, la marea con el ingreso de agua del Océano Atlántico al Mar Mediterráneo produce solitones generados independientemente. La razón de esto es la superposición de la más salada, es decir, el agua más pesada del Mar Mediterráneo, que se comprime a una profundidad de unos 60-80 m en la corriente hacia el este y se desvía hacia arriba. La fotografía aérea muestra el Estrecho de Gibraltar entre Europa y África.



Los fenómenos de las ondas

Numerosas observaciones inesperadas tanto de la propagación del sonido en el agua como de las propias ondas de agua son fascinantes. La mayoría de las observaciones pueden ser descritas matemáticamente, pero las causas en detalle no siempre son conocidas. Por ejemplo, los solitones y los tsunamis pueden ser descritos con la misma ecuación diferencial parcial según Korteweg - de Vries. Aparte de la abstracción matemática, los experimentos de laboratorio son necesarios para comprender mejor las causas de su aparición. Si la simulación tiene éxito, aparecerá un entendimiento más profundo de las razones naturales de su formación.

