

Lección 4: Propagación de ondas en gases y licuefacción de gas

Resumen

La propagación de las ondas en los gases depende de la elasticidad, densidad y temperatura del medio. Las ondas acústicas en el aire ocupan un rango de frecuencia de 10 órdenes de magnitud. Para la propagación del sonido en el aire hay exactamente una forma de oscilación. Cuando el gas se enfriá, se produce una transición de fase a la fase líquida. Hay similitudes con los líquidos, pero hay que tener en cuenta algunas características especiales.

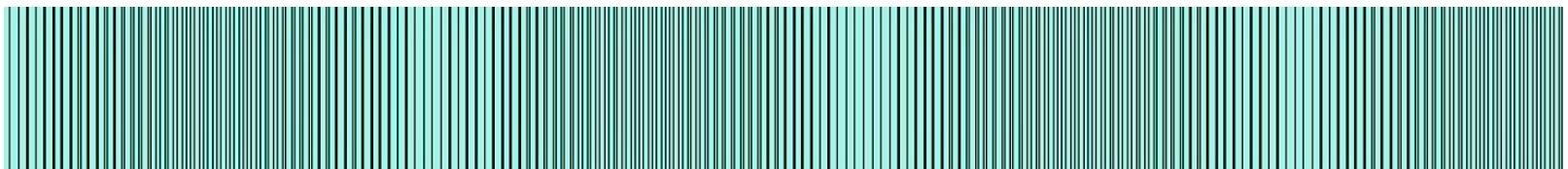
Tabla de contenidos

- Folio 2: Las ondas acústicas en el aire
- Folio 3 – 4: La velocidad del sonido (1-2)
- Folio 5 – 6: Velocidad supersónica (1-2)
- Folio 7: Las ondas acústicas – infrasonido
- Folio 8: El ultrasonido en la naturaleza
- Folio 9: La superposición de ondas acústicas
- Folio 10: La curva de seguimiento
- Folio 11: La licuación de gas
- Folio 12: El estado supercrítico
- Folio 13 – 16: La licuefacción de hidrógeno (1-4)
- Folio 17: Los gases y la termodinámica

Las ondas acústicas en el aire

Las ondas que percibimos diariamente son la luz y el sonido. La luz como oscilación electromagnética no está ligada a un medio. Esto se discutirá en una de las siguientes lecciones. En esta lección se tratarán los fenómenos de las ondas acústicas y su uso en la naturaleza y en la investigación científica.

Las dos clases principales de ondas son las ondas longitudinales y transversales. Estas últimas sólo existen si hay fuerzas de restablecimiento. En los gases, las moléculas se mueven libremente en todas las direcciones del espacio, es decir, la propagación de una onda existe sólo mediante una fluctuación de densidad que es una onda longitudinal. La velocidad del sonido en condiciones ambientales normales es de 340 m/s.



La velocidad del sonido puede derivarse de la ecuación de la onda. Debido a la velocidad y a la longitud de onda, la propagación del sonido es adiabática, es decir, sin intercambio de calor por compresión y expansión.

La velocidad del sonido (1)

$$c^2 = \frac{1}{\text{compresibilidad adiabática} \cdot \text{densidad}}$$

$$\text{compresibilidad adiabática} = \frac{c_v}{c_p} \cdot \frac{1}{p}$$

$$c_{\text{sonido}} = \sqrt{\frac{c_p}{c_v} \cdot \frac{p}{\rho}} = \sqrt{\frac{c_p}{c_v} \cdot \frac{RT}{M}} \quad \text{para un gas ideal}$$

c_p/c_v : exponente adiabático = la relación de las capacidades caloríficas de los gases a presión constante (c_p) y a volumen constante (c_v); p : presión; ρ : densidad; R : constante gaseosa universal; T : temperatura absoluta; M : masa molar

Exponente adiabático	Tipo de molécula
1.67	gases monoatómicos (gases nobles)
1.40	gases diatómicos (N_2 , O_2 , H_2 , CO)
1.33	gases triatómicos o más (H_2O , H_2S , CH4)
1.29	gases poliatómicos (NH_3 , ...)
1.25	moléculas más grandes (C_2H_6 , CH_3OH , ...)

La velocidad del sonido (2)

Con las constantes, se calcula para la velocidad del sonido en el aire

$$c_{sonido, aire}(T) = 343 \text{ m/s} \cdot \sqrt{\frac{T[K]}{293[K]}}$$

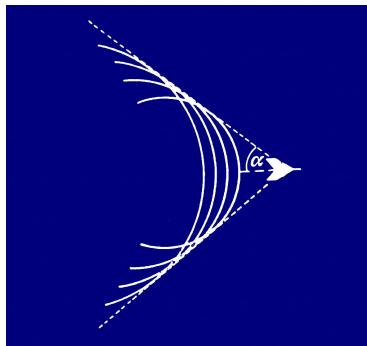
La propagación del sonido en el aire no muestra dispersión en el rango de la frecuencia audible. Efectos no lineales se observan a grandes amplitudes de sonido (detonación). Las crestas de las ondas, es decir, los frentes de onda de máxima densidad, se propagan más rápidamente que los valles de las ondas, lo que da lugar a formas de ondas más abruptas y, en casos extremos, a la aparición de una onda de choque.

Para la percepción fisiológica del oído, vale un rango de frecuencia desde 16 Hz hasta 18000 Hz con una sensibilidad máxima a 4 kHz. Este sonido se sigue percibiendo con una intensidad (potencia/área) de 10^{-12} W/m^2 directamente a la oreja. El límite del dolor es 1 W/m^2 .

Velocidad supersónica (1)

Si un objeto se mueve en un medio con la misma velocidad de propagación que la velocidad del sonido correspondiente, todas las crestas de onda emitidas anteriormente con amplitud decreciente se suman en la dirección del movimiento y forman la llamada barrera del sonido. La velocidad relativa de un objeto a la velocidad del sonido en el aire se denomina con el número Mach, M , según el investigador Ernst Mach. Si el objeto se mueve más rápido que las crestas, las crestas formadas más tarde se superponen a las anteriores y se genera un espacio en forma de cono. El ángulo de apertura del cono se deriva del número Mach.

$$\sin \alpha = \frac{c_{sonido}}{v_{objeto}} = \frac{1}{M}$$



Tal choque de compresión se percibe como un estallido extremadamente fuerte. Debido al enfriamiento adiabático del aire en la zona de presión baja en la parte trasera del avión, el vapor de agua en el aire se condensa y forma una nube característico.



Velocidad supersónica (2)

El fenómeno equivalente al choque supersónico también existe para las ondas electromagnéticas y se llama radiación Cherenkov. Cuando una partícula cargada se mueve a través de un medio dieléctrico no conductor, los átomos a su paso se polarizan brevemente por su carga y generan radiación electromagnética. Las ondas de los átomos adyacentes no interfieren de forma destructiva si la partícula se mueve más rápido que la luz en él. La dirección de la radiación emitida a lo largo de la trayectoria describe un cono de Mach. El ángulo entre la dirección de la trayectoria de la partícula y de la radiación depende de la velocidad de la partícula y la velocidad de la luz en el medio con un índice de refracción n .



$$\sin \alpha = \frac{c/n}{v_{partícula}}$$



Si la velocidad de la partícula está cerca de la velocidad de la luz en el vacío (c), el número Mach corresponde al índice de refracción del medio.

Para la intensidad de la luz emitida vale $I \sim v^2$, es decir, predomina la parte azul del espectro visible.

Las ondas acústicas – infrasonido

El cerebro puede procesar diferencias en el tiempo de propagación del sonido mayores que $10 \mu\text{s}$. A una velocidad promedio del sonido de 340 m/s y la distancia entre las orejas (21.5 cm), la precisión de la localización de una fuente es de 1.5° . Por debajo de 16 Hz el sonido se llama infrasonido, por encima de 18 kHz hasta 10^9 Hz ultrasonido. La atenuación del infrasonido con una longitud de onda de unos pocos kilómetros es extremadamente pequeña, de modo que la propagación tiene lugar a lo largo de miles de kilómetros. Unos pocos dispositivos detectores monitorean toda la superficie de la tierra. Para la detección se utilizan (micro) barómetros muy sensibles con compensación de las fluctuaciones de la presión atmosférica meteorológica. La causa del infrasonido puede ser las olas del océano, tormentas, terremotos, caídas de meteoritos, erupciones volcánicas, o incluso explosiones.



El ultrasonido en la naturaleza

El ultrasonido es conocido por los murciélagos que utilizan la detección ultrasónica para la caza. La frecuencia de los pulsos emitidos está en el rango de $9 \text{ kHz} - 200 \text{ kHz}$. Las presas como los insectos ya no producen un eco suficiente si su tamaño es menor que 1 longitud de onda. Esto corresponde a un tamaño de insecto de 1 milímetro.

Se supone que el eco del ultrasonido se superpone al batido de las alas de los insectos y se identifican por él. La distancia d de la presa se realiza a partir del tiempo Δt entre la emisión del pulso y la llegada del eco.

$$d = \frac{1}{2} \cdot c_{sonido} \cdot \Delta t$$

De la menor diferencia de tiempo posible de 0.1 ms sigue la menor distancia al objeto.

$$d = \frac{1}{2} \cdot 340 \cdot 0.0001 \cdot 100 \text{ cm} \approx 2 \text{ cm}$$



La superposición de ondas acústicas

La onda sonora reflejada por el objeto se altera en su frecuencia porque las velocidades del cazador y de la presa son diferentes. Este fenómeno se llama el efecto Doppler. Debido a la reflexión, el cambio de frecuencia se duplica.

$$\frac{\Delta\nu}{\nu} = 2 \cdot \frac{\Delta\nu}{c_{sonido}} \quad \text{si vale: velocidades} \ll c_{sonido}$$

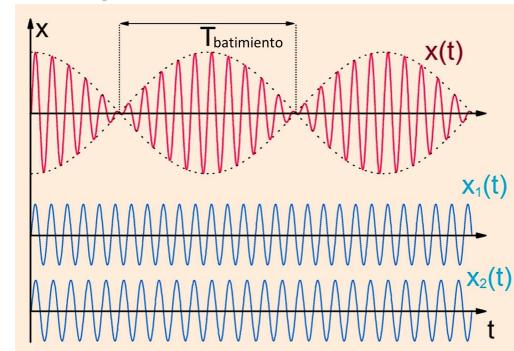
$\Delta\nu$: el cambio de la frecuencia del eco detectado

$\Delta\nu$: diferencia en las velocidades de vuelo del cazador y de la presa

Con la superposición de ondas similares se obtiene la diferencia de las frecuencias, conocido como frecuencia de batimiento.

$$v_{batimiento} = |\nu_1 - \nu_2|$$

Si el cazador (murciélagos) aumenta su velocidad, la frecuencia de batimiento incrementa y hay una posibilidad de capturar el objeto. Si la frecuencia de batimiento llega a cero durante la caza, el cazador y la presa son igualmente rápidos y la presa escapará. Este principio también se utiliza en el tráfico y en el espacio aéreo para el control de la velocidad que se llama radar.



La curva de seguimiento

Si el murciélagos ha recibido el eco de un insecto, intentará capturarlo en una curva de seguimiento. Con una velocidad constante y un movimiento en línea recta de la presa, el cazador siempre se alinearán con el objeto. El cazador tiene que seguir una trayectoria llamada curva de seguimiento. Este tipo de curva de seguimiento se calcula a partir de ecuaciones diferenciales. El resultado se llama radiodromo.

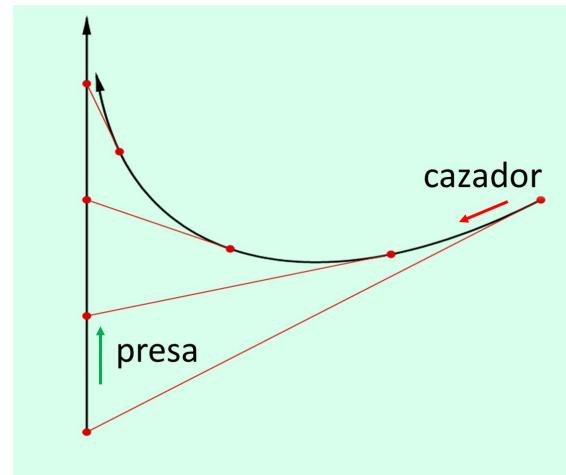
$$y(x) = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{1 - x^{\left(1 - \frac{v_p}{v_c}\right)}}{1 - \frac{v_p}{v_c}} - \frac{1 - x^{\left(1 + \frac{v_p}{v_c}\right)}}{1 + \frac{v_p}{v_c}} \right)$$

v_p : velocidad de la presa

v_c : velocidad del cazador

El cazador sólo tiene éxito si vale: $\frac{v_p}{v_c} < 1$

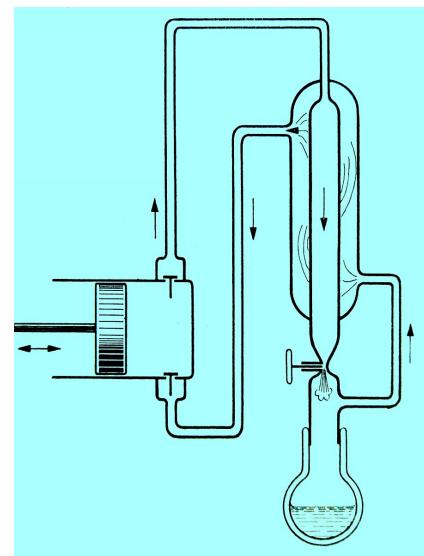
Esas curvas de seguimiento pueden observarse en general en la naturaleza y también se utilizan técnicamente.



La licuación de gas

Cuando el aire se expande a través de una válvula de mariposa, experimenta un enfriamiento. Este fenómeno se llama el efecto Joule-Thomson por sus descubridores. La magnitud del efecto y su signo (+/-) está determinada por la fuerza de atracción y repulsión entre las moléculas de gas. Para la mayoría de los gases y mezclas de gases (N_2 , O_2 , CO_2) la temperatura disminuye. Para H_2 , He y Ne la temperatura aumenta. Estos últimos sólo pueden ser enfriados y licuados si son pre enfriados por debajo de la temperatura de inversión. Para el cálculo de los efectos, se tiene que utilizar la ecuación del gas real según Van der Waals. El proceso técnico de licuefacción de gas se basa en el principio de la contracorriente. El gas expandido que sale de la válvula de mariposa se utiliza para pre enfriar el gas comprimido.

Durante la transición de la fase gaseosa a la fase líquida, se puede alcanzar un cierto punto en el que el gas y el líquido tienen propiedades idénticas. Este estado se llama supercrítico y se caracteriza por sus propiedades especiales.

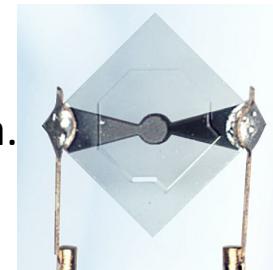


El estado supercrítico

La temperatura de inversión y los datos termodinámicos del estado supercrítico de algunos gases se muestran en la tabla.

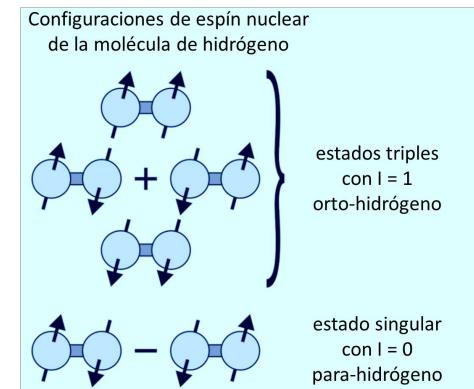
Tipo de gas	$T_{\text{inversión}}$ [°C]	$T_{\text{supercrítico}}$ [°C]	$p_{\text{supercrítico}}$ [bar]	$\rho_{\text{supercrítico}}$ [g/cm³]
O_2	~ 487	-119	50	0.43
N_2	~ 487	-147	34	0.31
CO_2	~ 190	31	74	0.47
H_2	-73	-240	13	0.03
He	-233	-268	2.3	0.07
H_2O (vapor)	-	374	221	0.32

Los fluidos supercríticos unen el alto poder de disolución de los líquidos con la baja viscosidad de los gases. Por lo tanto, son disolventes ideales. El SiO_2 puede ser disuelto en agua supercrítica. Al cristalizarse, crecen cristales individuales de cuarzo. Luego se cortan en pequeños trozos y se usan como cristales oscilantes.



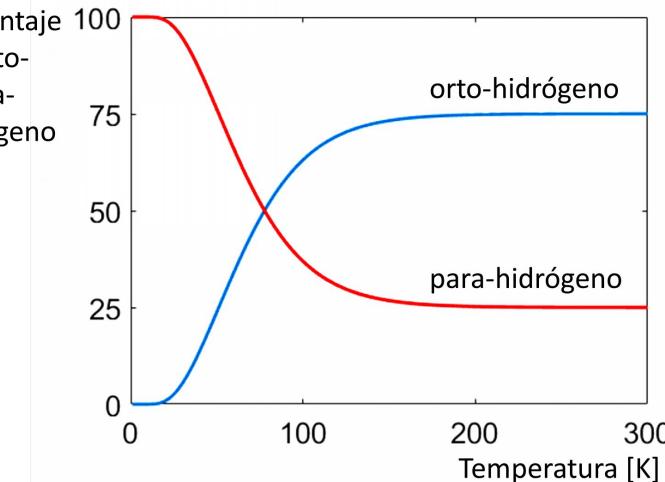
La licuefacción de hidrógeno (1)

Al realizar la licuefacción del hidrógeno y, sobre todo, el almacenamiento del hidrógeno líquido, hay que tener en cuenta que existen 2 tipos de moléculas. Estos son diferentes en la simetría de su configuración de espín nuclear y estados de rotación. El hidrógeno es una mezcla de ambos tipos; el equilibrio termodinámico de la proporción de mezcla depende de la temperatura. El protón tiene un espín nuclear con el valor $1/2 \hbar$ (partícula de Fermi), que puede asumir 2 estados diferentes: 'arriba' y 'abajo'. Como los protones son indistinguibles, la molécula diatómica debe ser considerada como un entero. En el mundo cuántico, los 2 espines nucleares se acoplan a un espín total I , que puede tomar los valores 0 y 1. En total, hay 4 estados propios de la función de la onda de espín nuclear: 3 estados triples con $I = 1$ y números cuánticos de espín magnético $M = -1, 0, +1$ así como un estado singular con $I = 0$ y $M = 0$. Los 3 estados triples son simétricos y se denominan orto-hidrógeno (o-H_2); el estado singular es antisimétrico y se denomina para-hidrógeno (p-H_2).



La licuefacción de hidrógeno (2)

Para la simetría, es decisivo el número cuántico de rotación J , que corresponde a un momento angular orbital. En el caso de p-H₂, el valor más bajo posible es $J = 0$. Para o-H₂, el valor más bajo posible es $J = 1$. La energía de rotación de la molécula de H₂ es proporcional a $J \cdot (J + 1)$, por lo que el estado de energía más bajo de o-H₂ es mayor que el de p-H₂. La diferencia es de 1.455 kJ/mol . Con elevadas temperaturas, muchos estados J están ocupados y se logra una distribución igual de los 4 estados de giro nuclear, es decir, 75 % de o-H₂ y 25 % de p-H₂. A temperatura ambiental, esta proporción ya está casi alcanzada. Sin embargo, a bajas temperaturas, sólo se ocupan los niveles de energía con un J muy pequeño, y la diferencia de energía entre o-H₂ con $J = 1$ y p-H₂ con $J = 0$ se hace considerable. En el caso límite $T \rightarrow 0 [K]$, sólo el nivel de rotación más bajo $J = 0$ está ocupado y la proporción de p-H₂ aumenta al 100 %.



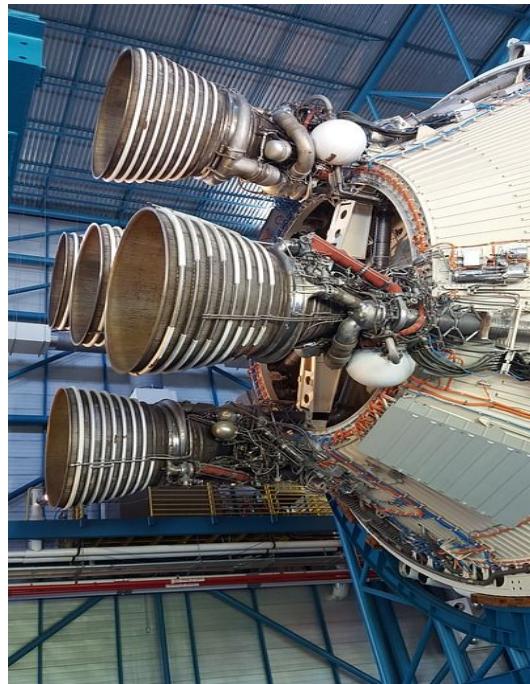
La licuefacción de hidrógeno (3)

La transición de orto-hidrógeno a para-hidrógeno bajo la emisión de un quantum de energía es relativamente rara, ya que se conoce en la espectroscopia como ‘transición prohibida’. Por consiguiente, el ajuste del equilibrio termodinámico tiene lugar lentamente. Ya que el estado básico del para-hidrógeno es energéticamente más bajo que el del orto-hidrógeno, la diferencia de energía se libera en forma de calor durante la conversión. La energía liberada es de 1.091 kJ/mol ($= 3/4 \cdot 1.455 \text{ kJ/mol} = 1.091 \text{ kJ/mol}$), que es mayor que el calor de vaporización de 0.904 kJ/mol necesario para convertir el hidrógeno líquido al estado gaseoso. Por lo tanto, debido a la conversión orto-para, una gran fracción de hidrógeno líquido se vaporizará si no se toman ya medidas de precaución adecuadas durante la licuefacción, el transporte y el almacenamiento. Por lo tanto, este proceso se acelera catalíticamente (adición de partículas ferromagnéticas).



La licuefacción de hidrógeno (4)

El hidrógeno líquido se utiliza como combustible de cohete en la propulsión a base de hidrógeno y oxígeno. La vaporización por la conversión orto-hidrógeno - para-hidrógeno provoca un fuerte aumento de la presión que puede hacer estallar el tanque. Por lo tanto, es importante almacenar el hidrógeno líquido en su equilibrio térmico.



Los gases y la termodinámica

El tratamiento del gas no sólo es importante en los procesos de transporte, licuefacción de gas o generación de momento (propulsión de cohetes), sino también en la conversión de energía. Por ejemplo, es posible convertir completamente la energía mecánica, eléctrica o química en energía térmica. La energía térmica, por otro lado, sólo puede ser convertida parcialmente en estas energías, y sólo con un gran esfuerzo técnico. La eficiencia de una máquina térmica indica la relación de conversión de la energía mecánica obtenida al calor suministrado (energía térmica). La máxima eficiencia de una máquina térmica está determinada por la relación de las temperaturas. El rendimiento alcanzable de la máquina de vapor a la planta de energía nuclear es un poco más del 30%.



$$\eta \text{ (rendimiento)} = 1 - \frac{T_{frío(salida)}[K]}{T_{caliente(entrada)}[K]}$$



La física está descrita por las leyes de la termodinámica. Si los sistemas considerados constan de al menos 10^{22} partículas, lo que siempre ocurre en los sistemas técnicos, el calor, la presión, el volumen y la temperatura se utilizan como variables medidas y calculadas.