

## **ESTUDIO EXPERIMENTAL DE MECANISMOS BÁSICOS DE INTERACCIÓN ACÚSTICA ENTRE PARTÍCULAS EN AEROSOLES**

REFERENCIA PAC: 43.25.T

González Gómez Iciar, Gallego Juárez J. A.  
Instituto de Acústica, C.S.I.C.  
Serrano 144  
28006 Madrid. España  
Tel: 34 915 618 806  
Fax: 34 914117651  
E-Mail: iacgg38@ia.cetef.csic.es

### **ABSTRACT**

An experimental study of visualization of acoustic interactions induced between micronic particles in light monodisperse aerosols is carried out at two frequencies, 500hz and 700hz. Diverse attraction processes are observed in the experiment between clusters of particles, associated to the hydrodynamic mechanism of viscous origin known as the acoustic wake effect. However, the attractions found between single particles agree with another hydrodynamic mechanism known as the mutual radiation pressure, referred to the particle scattering waves.

### **RESUMEN**

Se ha desarrollado un estudio experimental de visualización de interacciones acústicas entre partículas micrónicas de aerosoles monodispersos. en el experimento se han aplicado campos acústicos a 500hz y 700hz. Se han observado atracciones entre grupos de partículas asociados al mecanismo hidrodinámico de origen viscoso conocido como efecto de estela acústica. Sin embargo, las interacciones encontradas entre parejas de partículas sencillas no responden a este mecanismo sino a otro asociado a la presión de radiación mutua.

### **1. INTRODUCCION**

La aplicación de campos acústicos de alta intensidad sobre medios multifásicos y, en particular, sobre aerosoles, genera a menudo procesos de aglomeración acústica entre sus partículas. Los complejos mecanismos que intervienen en estos procesos se clasifican en dos grupos, ortocinéticos e hidrodinámicos, asociados a interacciones directas e indirectas, respectivamente. El campo acústico arrastra parcialmente a las partículas, haciéndolas oscilar con él. Las colisiones directas que se producen entre partículas de diferente tamaño y/o densidad, arrastradas de diferente manera, se describen a través del mecanismo denominado ortocinético. Además, debido a efectos no lineales del campo acústico se generan ciertas fuerzas de origen hidrodinámico que actúan sobre las mismas, induciéndolas a acercarse o repelerse desde distancias muy superiores a sus desplazamientos acústicos. Estos procesos indirectos son

gobernados por mecanismos denominados hidrodinámicos, en los que se produce una interacción no lineal entre las partículas y el medio fluido. Los mecanismos ortocinéticos son bien conocidos y existen diversos modelos en la literatura que los describen adecuadamente [1-2]. Sin embargo, los modelos desarrollados para describir los mecanismos hidrodinámicos no han logrado una descripción completa hasta el momento y solamente uno de ellos ha sido parcialmente verificado experimentalmente [3,4,5]. Este es el denominado "efecto de estela acústica" (AWE), asociado a la generación de asimetrías viscosas en el fluido en torno a las partículas, que producen desviaciones irreversibles en las trayectorias de otras partículas próximas, dando lugar a un acercamiento entre las mismas. Existe un segundo mecanismo hidrodinámico debido a la presión de radiación mutua (PRM) generada entre partículas próximas. Este mecanismo está relacionado con la interacción no lineal producida entre las ondas de scattering generadas por las partículas. Los estudios teóricos existentes en la literatura tratan de describir este mecanismo [6,7,8], pero a menudo presentan resultados divergentes. Por otra parte, no existe ningún estudio experimental que confirme su presencia como causa de interacciones entre partículas, lo que pone de manifiesto la necesidad de su verificación como un mecanismo aislado de interacción acústica.

Por ello, el objetivo de este trabajo era ampliar la información existente sobre los mecanismos AWE y PRM en suspensiones monodispersas de partículas micrónicas, donde los mecanismos ortocinéticos están inhibidos.

## **2. EXPERIMENTO**

### **2.1 Búsqueda de condiciones óptimas para la PRM**

Para llevar a cabo el estudio se han buscado las condiciones óptimas del campo acústico y del dispositivo óptico de visualización. La realización del trabajo experimental ha implicado, por lo tanto, un estudio teórico previo de optimización de los parámetros que determinan cada uno de los dos mecanismos hidrodinámicos, es decir, de la frecuencia y la intensidad del campo acústico en función del tamaño y densidad de las partículas que constituyen el aerosol. Posteriormente se han seleccionado aquellas condiciones para las que el mecanismo de presión de radiación mutua (PRM) sea más intenso y simultáneamente el efecto de la estela acústica se encuentre inhibido.

Debido a las limitaciones físicas del dispositivo experimental, se han seleccionado suspensiones monodispersas de microesferas de vidrio con diámetros de  $7.9\mu\text{m}$ . En un estudio de simulación numérica, utilizando el método de Runge-Kutta de 4º orden, se describen las velocidades y trayectorias de acercamiento entre parejas de estas partículas generadas por cada uno de los dos mecanismos hidrodinámicos a diversas frecuencias. Se ha encontrado una situación óptima de interacción según PRM para las partículas seleccionadas en un rango de frecuencias comprendido entre 500Hz y 700Hz, para el cual la velocidad de atracción debida al efecto de la estela acústica es mucho menor.

En estas condiciones de trabajo hemos de considerar además el efecto de arrastre que el campo acústico ejerce sobre las partículas, haciéndolas oscilar parcialmente con él. Este arrastre disminuye cuando la frecuencia aumenta [9], de manera que las partículas se muestran más inertes, intensificando su perturbación al fluido viscoso que las rodea. Dicha perturbación se transmite a través del medio a otras partículas próximas, cuya dinámica se ve alterada, dando lugar a procesos irreversibles de acercamiento entre las mismas. Así se produce el efecto de la estela acústica, tanto más eficiente cuanto menor sea el arrastre experimentado por las partículas. A 500Hz y 700Hz el coeficiente de arrastre acústico de las partículas seleccionadas es de 0.56 y 0.45 respectivamente, por lo que siendo tan elevado favorece la inhibición de dicho mecanismo.

Además, el mecanismo hidrodinámico PRM predice atracciones máximas a 700Hz para las partículas seleccionadas.

Por lo tanto, se han de aplicar campos acústicos variables a dos frecuencias de 500Hz y 700Hz y velocidades acústicas variables entre 0.3m/s y 0.44m/s.

## 2.2. Dispositivo experimental

Para llevar a cabo el estudio se ha desarrollado un dispositivo (ver figura 1) que consta esencialmente de 3 partes: una cavidad acústica en la que las partículas son sometidas al campo acústico, un dispositivo de detección óptica y procesado de imágenes y un sistema de iluminación de la cavidad acústica para la filmación de imágenes.

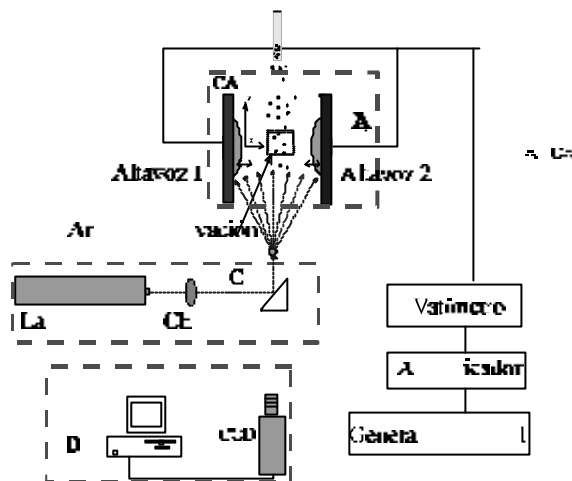


Figura 1

La cavidad acústica está constituida por dos altavoces enfrentados y separados una distancia  $d$  mucho menor que una semilongitud de onda acústica. Los altavoces están conectados eléctricamente en contrafase, de manera que sus membranas vibran en fase desplazando el volumen de aire contenido entre ellos como una masa incompresible y generándose así una onda estacionaria casi homogénea. Debido a la geometría circular de las membranas (de diámetro  $F=52mm$ ) se obtiene una cavidad acústica cilíndrica en torno al eje central. Los altavoces están separados una distancia  $d=22mm$ . La cavidad acústica está dispuesta horizontalmente, de manera que el campo acústico actúa perpendicular a la dirección de la gravedad.

Para verificar la condición de onda estacionaria en la cavidad se comparan amplitudes de presión medidas con simples cálculos basados en propagación de onda plana, sin consideración de pérdidas [9].

El dispositivo de detección óptica para la adquisición de imágenes y procesado de las mismas consiste en una cámara CCD (Pulnix-765) una tarjeta grabadora (Scio LG-3) y un ordenador en el que corre el programa de software NIH Image v. 1.61. La cámara está adaptada a un conjunto de lentes ópticas dispuestas en zoom y acopladas a unos tubos de extensión, pudiendo aumentar de forma variable su resolución hasta obtener un valor máximo de  $4.93\mu m$  por pixel de cada imagen digitalizada. Así se obtiene un área de observación de  $3.72 \times 2.86 mm^2$ . La calibración del dispositivo se obtuvo con una malla convencional de calibración de microscopía electrónica HT300. Las partículas esféricas de vidrio con diámetros  $F_p=7.9 \pm 0.8\mu m$  se introducen en la cavidad acústica en disposición laminar e iluminadas desde abajo con un haz de láser He-Ne abierto en forma de abanico. Durante su caída atraviesan la zona central de la cavidad acústica, donde son filmadas para su análisis. Las partículas son arrastradas lateralmente por el campo acústico mientras caen debido a la gravedad, describiendo trazas luminosas sinusoidales. La reconstrucción de sus trayectorias se realiza mediante el corte y empaste de estas trazas brillantes en fotogramas consecutivos de cada película.

La resolución temporal del dispositivo es inicialmente de  $40ms$ , ya que se adquieren 25 fotografías por segundo. Sin embargo, los tiempos de interacción observados entre las partículas son a menudo inferiores. A las frecuencias seleccionadas, la gran amplitud de desplazamiento

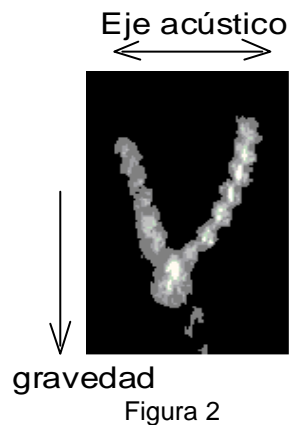
acústico experimentado por las partículas permite aumentar dicha resolución hasta la duración de un ciclo acústico.

Una vez reconstruidas las trayectorias de las partículas se procede al análisis espacial de sus interacciones.

### 2.3. Resultados experimentales

A pesar del corto rango de variación de las frecuencias acústicas seleccionadas para el experimento se observa una diferencia de comportamiento entre las partículas a 500Hz y 700Hz.

Para la frecuencia más baja y velocidades de  $0.4m/s$  no se observa ningún proceso de interacción entre parejas de partículas sencillas. Estas son desplazadas lateralmente por el campo acústico durante su caída sin variar sus posiciones de equilibrio. Sin embargo, a menudo se observan procesos atractivos entre colecciones de partículas que caen en grupo desde la parte superior de la cavidad acústica. Cada uno de estos grupos se comporta como una partícula gruesa que, apenas arrastrada por el campo acústico, perturba muy intensamente el fluido circundante (se alcanzan números de Reynolds elevados). Ambos grupos experimentan una fuerte atracción que desemboca en colisión, como se muestra en la imagen filmada de la figura 2. Estos procesos muestran máximos de atracción cuando los dos grupos de partículas están alineados con el eje acústico, verificando el mecanismo AWE, que predice máximas atracciones a lo largo de dicho eje.



Sin embargo, estos diagramas de atracción a modo de diapason no han sido observados en el experimento entre parejas de partículas simples, coincidiendo con la teoría, que no prevé atracciones para tan elevados coeficientes de arrastre acústico (0.56 a 500Hz). De esta manera, las interacciones entre parejas de partículas debidas al AWE se encuentran prácticamente inhibidas, como se confirma en el experimento.

Sin embargo, a  $700\text{ Hz}$  se observan procesos combinados atractivo-repulsivos entre parejas de partículas cuya línea de orientación presenta un ángulo elevado respecto al eje acústico. A esta frecuencia y para una velocidad de  $0.44m/s$  se observa este comportamiento en las imágenes filmadas de la figuras 3 y 4.

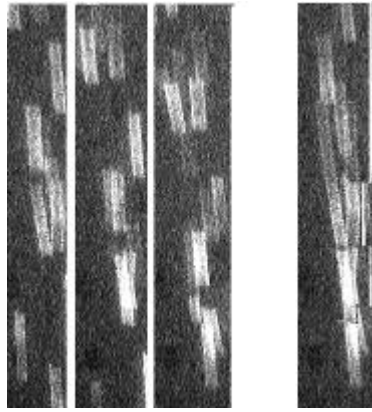


Figura 3

En el proceso filmado de la figura 3 las partículas comienzan su atracción desde una orientación inicial próxima a los  $60^\circ$  respecto al eje acústico. En el 2º fotograma se observa el inicio de una repulsión entre las partículas, prácticamente alineadas con el campo acústico. Este comportamiento repulsivo se confirma en la siguiente imagen.

En las imágenes filmadas de la figura 4 se observa muy claramente el mismo comportamiento combinado de atracción-repulsión. Aquí las partículas inician su atracción desde un ángulo inicial de  $60^\circ$  (1º fotograma) que disminuye hasta  $35^\circ$  (2º fotograma), a partir del cual comienzan a repelerse.

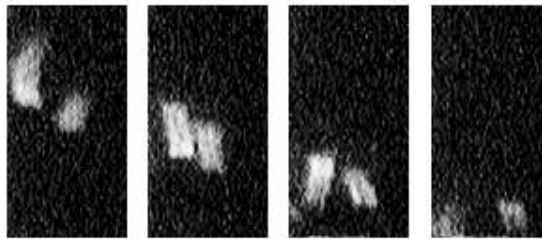


Figura 4

Ambos procesos muestran un comportamiento de las partículas similar al esperado teóricamente según el mecanismo de PRM, que predice atracción para ángulos elevados de orientación respecto al eje acústico y repulsión entre partículas alineadas con el mismo u orientaciones próximas a ésta [10].

Comparemos estos resultados con otros obtenidos en un estudio experimental realizado anteriormente para las mismas partículas a una frecuencia de 3kHz [5] y velocidades del campo acústico próximas a 1m/s, alcanzándose nº de Reynolds de 0.5 y un coeficiente de arrastre inferior a 0.2. En aquel estudio se cuantificaron 46 procesos atractivos con colisión entre parejas de partículas orientadas desde ángulos inferiores a  $45^\circ$  respecto a la dirección del campo acústico aplicado. Las figuras de aproximación observadas, con forma de diapasón, muestran máximos de atracción entre partículas alineadas con el eje acústico (ver figura 5), como prevé el efecto de la estela acústica.



figura 5

### 3.CONCLUSIONES

El estudio experimental realizado a 500Hz y 700Hz ha verificado la inhibición del mecanismo hidrodinámico de interacción asociado al efecto de la estela acústica entre partículas con diámetros de  $7.9\mu\text{m}$  para estas frecuencias. Sin embargo, determinadas condiciones acústicas han permitido verificar dicho mecanismo entre grupos de partículas que presentan un coeficiente de arrastre "efectivo" muy bajo (generando alto  $n^\circ$  de Reynolds).

Se han observado procesos combinados de atracción-repulsión entre parejas de partículas a 700Hz, frecuencia óptima prevista teóricamente por el mecanismo asociado a la presión de radiación mutua para las partículas seleccionadas. Los procesos observados concuerdan con la predicción teórica, mostrando atracciones para grandes ángulos de orientación respecto al eje acústico y fuertes repulsiones entre partículas alineadas con dicho eje.

### 4. BIBLIOGRAFIA

- [1] O. Brandt and E. Hiedemann, " *The aggregation of suspended particles in gases by sonic and supersonic waves*", Proc. Roy. Soc. London, 134, pp: 1101-1110. (1936).
- [2] E. P. Mednikov: "*Acoustic coagulation of aerosols and precipitation of aerosols*". New York Consultants Bureau. (1965).
- [3] T. L. Hoffmann, and G.H Koopmann: "*Visualization of acoustic particle interaction and agglomeration: Theory and Experiments*", J. Acoust. Soc. Am., 99 (4), pp:2130-2141. (1996)
- [4] I. González, T. L. Hoffmann, J. A. Gallego, "*Visualization of interactions between particles subjected to intense acoustic field*", Proceeding 1997 World Congress on Ultrasonics, 2, pp:422-423. Yokohama.(1997).
- [6] D. Shaw and K. Tu, "*Acoustic particle agglomeration due to hydrodynamic interaction between monodisperse aerosols*", J Aerosol Sci, 10, pp: 317-328.(1979).
- [7] M. Mironov, "*Bjerkness forces in a viscous medium and the acoustic coagulation of Aerosols*", Sv. Phys. Acoust., 14 (4), pp:487-492. (1976).
- [8] L. Song, "*Modeling of acoustic agglomeration of aerosol particles*", Ph. D. Dissertation, The Pennsylvania State University. (1990).
- [9] . González, T. Hoffmann, J. A. Gallego, "*Precise measurements of acoustic particle entrainments between 20Hz and 3.5kHzs*", Accepted for publication Journal of Science of Aerosols (2000).
- [10] I. González, "*Estudio de las interacciones hidrodinámicas de origen viscoso en la aglomeración acústica de partículas*", tesis doctoral, Universidad Complutense(1998).

