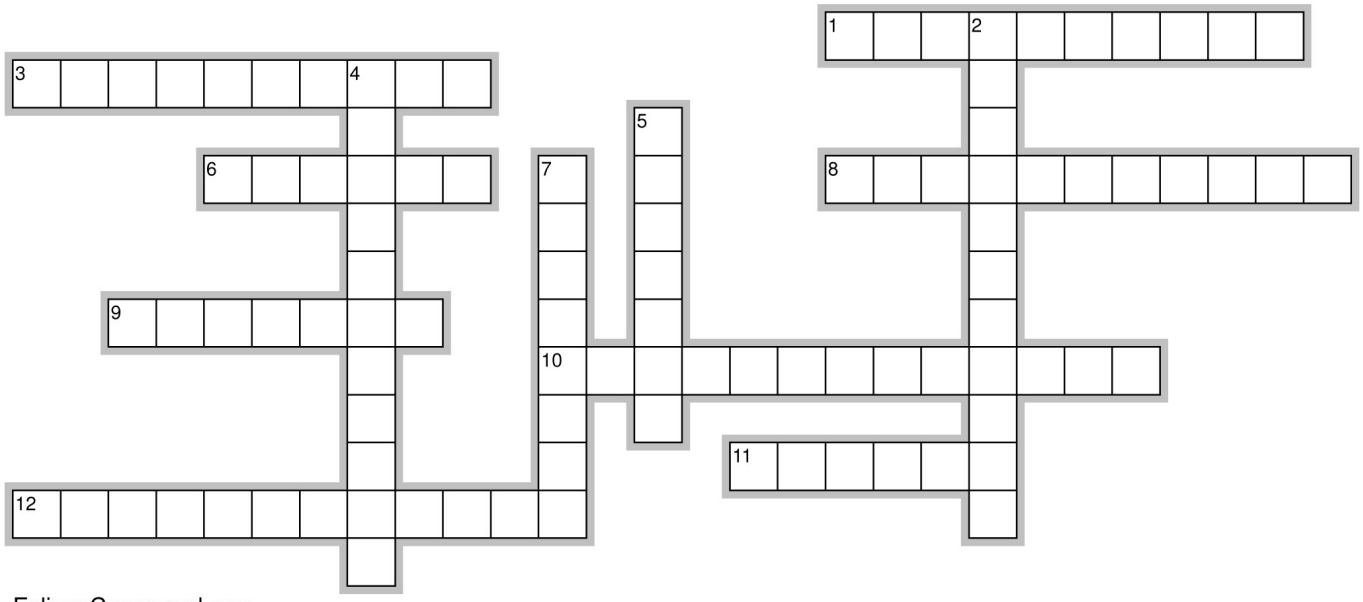
Burbujas y turbulencia

15/11/2025

BURBUJAS Y TURBULENCIA

A. REQUENA & VALLE DE ELDA, © 2025



EclipseCrossword.com

HORIZONTALES

1. Este investigador en 1941, formuló una teoría estadística para describir cómo la energía se transfiere desde los grandes remolinos de un fluido hasta escalas cada vez menores, donde finalmente se disipa en forma de calor debido a la viscosidad.
3. La de la turbulencia radica en que combina caos y regularidad, imprevisibilidad y ley estadística.
6. La elegancia de ésta, radica en que, sin necesidad de conocer los detalles microscópicos del flujo, permite describir estadísticamente la cascada de energía en un rango llamado rango inercial.
8. El equipo de Tian Ma, Andrew Bragg y Hendrik Hessenkemper diseñó uno de alta precisión para observar directamente lo que sucede alrededor de las burbujas.
9. Los investigadores dedujeron una matemática que estima la velocidad de disipación de energía únicamente a partir de dos parámetros: el tamaño de las burbujas y su densidad.
10. La constatación de que la teoría K41 se mantiene en un sistema tan complejo como un flujo de burbujas es un ejemplo de la que hay en todas las leyes físicas.
11. La de Kolmogórov, define el tamaño más pequeño de los vórtices antes de que la energía turbulenta se pierda.
12. Pese a su importancia práctica, la turbulencia inducida por burbujas es especialmente difícil de caracterizar. Cada burbuja genera una estela, y la interacción de cientos o miles de ellas crea un mosaico dinámico de remolinos, colisiones y éstas.

VERTICALES

2. Pese a que el fenómeno de la turbulencia se observa cotidianamente, sus leyes de este tipo, siguen siendo objeto de intensos debates científicos.
4. Ésta, ha sido descrita como “el último problema no resuelto de la física clásica”.
5. Es un hallazgo burbujeante que recuerda que ésta, como la espuma del mar o las burbujas de champán, combina belleza, complejidad y universalidad.
7. La turbulencia generada por éstas, no es un fenómeno exótico; de hecho, está presente en situaciones muy diversas.

El estudio de la turbulencia es uno de los problemas clásicos de la física moderna. Pese a que el fenómeno se observa cotidianamente, en el humo de un cigarrillo, en el oleaje marino, en el café cuando removemos con una cuchara, sus leyes matemáticas siguen siendo objeto de intensos debates científicos. En este contexto, un equipo internacional de investigadores del Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf (HZDR), la Universidad Johns Hopkins y la Universidad de Duke ha dado un paso significativo al demostrar que una teoría con más de ochenta años de antigüedad, la formulada por el matemático ruso Andréi Kolmogórov en 1941, también se aplica a un problema particular: la turbulencia generada por burbujas que ascienden en un fluido. El hallazgo no sólo zanja una controversia científica de largo alcance, sino que además abre la puerta a aplicaciones en ámbitos industriales y medioambientales.

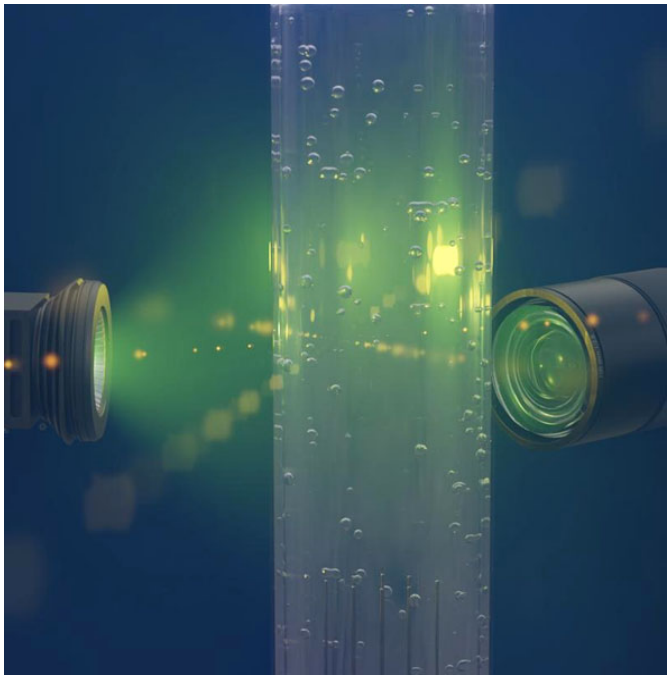
La turbulencia ha sido descrita como "el último problema no resuelto de la física clásica". En 1941, Andréi Kolmogórov formuló una teoría estadística para describir cómo la energía se transfiere desde los grandes remolinos de un fluido hasta escalas cada vez menores, donde finalmente se disipa en forma de calor debido a la viscosidad. Esta idea, conocida como teoría K41, estableció conceptos como la escala de Kolmogórov, que define el tamaño más pequeño de los vórtices antes de que la energía turbulenta se pierda.

La elegancia de la teoría radica en que, sin necesidad de conocer los detalles microscópicos del flujo, permite describir estadísticamente la cascada de energía en un rango llamado rango inercial. Sin embargo, la K41 fue desarrollada pensando en fluidos homogéneos y sin complicaciones externas. Cuando factores como burbujas, partículas o interfaces entran en juego, se dudaba de su validez. El interrogante que se mantenía es profundo: ¿puede una teoría concebida para turbulencias "puras" aplicarse también a flujos donde las burbujas son el motor principal del desorden?

La turbulencia generada por burbujas no es un fenómeno exótico; de hecho, está presente en situaciones muy diversas, como en la espuma del mar, donde millones de burbujas se forman y se rompen constantemente; en una copa de champán, donde el ascenso de las burbujas crea microcorrientes en el líquido; en reactores químicos, donde se inyecta gas en un líquido para promover mezclas o en el tratamiento de aguas residuales, en el que la aireación con burbujas es esencial para la actividad de los microorganismos depuradores.

Pese a su importancia práctica, la turbulencia inducida por burbujas es especialmente difícil de caracterizar. Cada burbuja genera una estela, y la interacción de cientos o miles de ellas crea un mosaico dinámico de remolinos, colisiones y oscilaciones. De ahí que los modelos previos ofrecieran resultados contradictorios sobre la aplicabilidad de la K41.

El equipo de Tian Ma, Andrew Bragg y Hendrik Hessenkemper diseñó un experimento de alta precisión para observar directamente lo que sucede alrededor de las burbujas. El montaje consistía en una columna de agua de 11,5 cm de ancho en la que se inyectaban burbujas de gas desde la base. Para capturar los movimientos: se utilizaron cuatro cámaras de alta velocidad, grabando a 2500 imágenes por segundo y se aplicó un seguimiento lagrangiano en 3D de dos fases, que permite rastrear simultáneamente la trayectoria de cada burbuja y de diminutas partículas trazadoras del fluido circundante. Con esta técnica, los investigadores pudieron reconstruir en tres dimensiones el complejo "baile" de las burbujas y los vórtices que generaban, con una resolución sin precedentes.



En dos de los cuatro escenarios estudiados (con burbujas de 3-5 mm de diámetro y densidad Moderada), las fluctuaciones turbulentas a pequeña escala se ajustaban sorprendentemente bien a las predicciones de Kolmogórov. Esto constituye la primera prueba experimental directa de la vigencia de la K41 en un flujo de burbujas. Los investigadores dedujeron una fórmula matemática que estima la velocidad de disipación de energía únicamente a partir de dos parámetros: el

tamaño de las burbujas y su densidad. Los datos experimentales confirmaron la validez de este modelo simplificado. Se descubrió que la escala de Kolmogórov es más evidente fuera de la estela directa de las burbujas. En estas regiones, el fluido está tan perturbado que la cascada de energía clásica queda enmascarada. Además, para que el rango inercial de Kolmogórov se manifestara plenamente, se necesitarían burbujas mucho más grandes. Sin embargo, tales burbujas son inestables y tienden a romperse, lo que impone un límite físico fundamental a la aplicabilidad de la K41 en este contexto.

La constatación de que la teoría K41 se mantiene en un sistema tan complejo como un flujo de burbujas es un ejemplo de la universalidad de las leyes físicas. Pese a haber sido formulada en un contexto ideal, la teoría parece capturar con notable precisión los procesos estadísticos de transferencia de energía. No obstante, el estudio también evidencia los límites naturales, como la imposibilidad de generar un rango inercial extenso con burbujas reales muestra que la teoría, aunque válida, se enfrenta a restricciones impuestas por la física del sistema. Es una lección sobre cómo la naturaleza impone condiciones que las matemáticas, por elegantes que sean, no pueden ignorar.

El hallazgo no es solo un triunfo teórico, también tiene consecuencias aplicadas: en la Industria química, ya que proporciona una mejor comprensión de los reactores de burbujeo, esenciales en procesos de síntesis y una optimización de la transferencia de masa gas-líquido. En el tratamiento de aguas, para el ajuste de los sistemas de aireación en depuradoras y una mayor eficiencia en el consumo energético. En modelos climáticos y oceanográficos, porque los océanos liberan enormes cantidades de burbujas durante tormentas y conocer cómo esas burbujas inducen turbulencia ayuda a modelar intercambios de gases entre océano y atmósfera. Finalmente, tiene interés en ingeniería alimentaria, porque desde en bebidas gaseosas hasta fermentaciones, la dinámica de burbujas es fundamental y para aplicar principios universales puede mejorar la calidad y consistencia de productos.

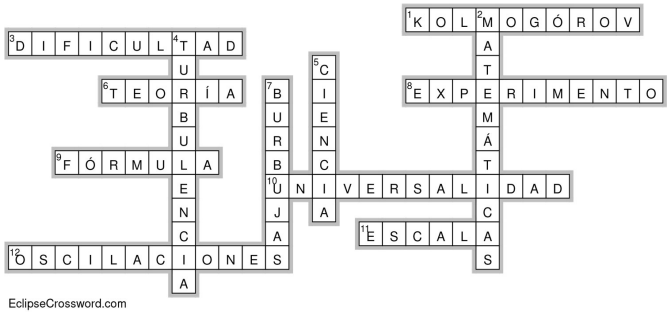
Quedan interrogantes a resolver como la turbulencia en burbujas de formas irregulares o deformables; analizar mezclas de burbujas de distintos tamaños y densidades, realizar experimentos bajo condiciones de microgravedad, como en la Estación Espacial Internacional, donde la dinámica de burbujas cambia radicalmente e integrar estos hallazgos en simulaciones numéricas avanzadas, que permitan extender los resultados a escalas mayores.
La dificultad de la turbulencia radica en que combina caos y regularidad, imprevisibilidad y ley estadística. Que la teoría de Kolmogórov, formulada en 1941, siga siendo un marco válido en contextos tan diversos como chorros, nubes, plasmas e incluso enjambres de burbujas, habla de la robustez de su planteamiento. La investigación demuestra que la teoría de Kolmogórov no es un artefacto limitado a la turbulencia idealizada, sino un marco que sigue iluminando fenómenos complejos ochenta años después de su formulación. En el caso de las burbujas, el hallazgo no sólo resuelve un debate científico, sino que también abre vías de aplicación en ingeniería, medio ambiente e industria.

La paradoja es reveladora, porque la naturaleza impone límites, como la imposibilidad de generar burbujas suficientemente grandes para un rango inercial perfecto, pero al mismo tiempo confirma que, en las condiciones adecuadas, las ideas de Kolmogórov resisten la prueba del tiempo.

En definitiva, un hallazgo burbujeante que recuerda que la Ciencia, como la espuma del mar o las burbujas de champán, combina belleza, complejidad y universalidad.

BURBUJAS Y TURBULENCIA

A. REQUENA & VALLE DE ELDA, © 2025



EclipseCrossword.com