

# Análogos Hidrodinámicos

Claudio Falcón

Profesor Asistente, Departamento de Física (DFI-FCFM), Universidad de Chile

<http://www.dfi.uchile.cl/index.php/academicos/perfil/20.html>

*Muchas veces la mejor manera de entender un fenómeno es mirarlo desde otro punto de vista mediante analogías. En Física, esta práctica es común debido a lo complejo y variado de los fenómenos bajo estudio. Recientemente, predicciones teóricas de fenómenos que hasta ahora han escapado al estudio sistemático en laboratorio han comenzado a ser observados mediante analogías hidrodinámicas. En este artículo describiremos algunas de éstas analogías (por ejemplo observar a un agujero negro análogo evaporarse en la cocina).*

Freeman Dyson, físico teórico y matemático inglés y poseedor de un nombre que cualquier estrella de rock que se precie de ello querría, argumentaba que el desarrollo de la Física del siglo XX ha dependido de manera diferente tanto de las herramientas teóricas (ideas) como de las experimentales (instrumentos) a lo largo del tiempo. Según Dyson durante las primeras tres décadas del siglo, la Física dependió fuertemente de las ideas de genios del talante de Einstein, Dirac,

Bohr, y Schrödinger. Luego, por cerca de 40 años, el desarrollo de la Física dependió mayormente del avance rápido de los instrumentos científicos basados en la técnica bélica de las Guerras Mundiales. Hacia el final del siglo XX, la Física florece por una combinación virtuosa de ideas nuevas y profundas junto con instrumentos con poder de resolución nunca antes alcanzado, permitiendo el desarrollo actual de la Física en temas de alto impacto para el futuro bienestar de la

## SABIAS QUE

Si perturbamos la superficie de un lago en reposo de tal manera que la longitud típica de la perturbación sea más larga que la profundidad del lago, las ondas que se generen en la superficie se moverán igual que las ondas de sonido en aire. Esto significa que las ondas de sonido y las ondas superficiales en la superficie de un lago son ondas no dispersivas: **la longitud de onda de la perturbación (la distancia que toma en repetirse espacialmente la onda) es igual al período de oscilación temporal de la onda (el tiempo que toma en repetirse temporalmente la onda) multiplicada por la velocidad del sonido.** En el caso de las ondas en la superficie de un lago, su velocidad es igual a la raíz cuadrada de la aceleración de gravedad multiplicada por la profundidad del lago. Así, la "velocidad del sonido" en las en la superficie de un lago como el lago Villarrica es de 40 m/s. Si cayera

un meteorito en el océano, la velocidad del sonido sería 5 veces más grande. Aún así, estas ondas (llamadas ondas superficiales de gravedad en aguas poco profundas) serían más lentas que las ondas del sonido en el aire (340 m/s).



FIG. 1: Bombarderos sobre el canal de Panamá sobrevolando ondas superficiales de gravedad en el límite de aguas poco profundas (National Geographic 63 (1933))

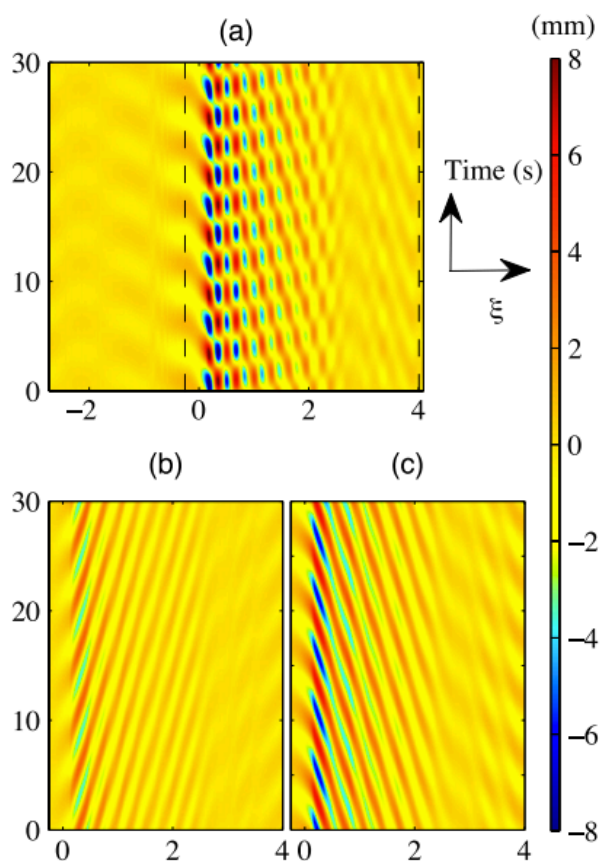


FIG 2: Análogo hidrodinámico a un agujero negro usando ondas superficiales de gravedad. El eje vertical corresponde al tiempo y el horizontal al espacio. En color está la amplitud de la onda superficial enviada en contra de un flujo constante sobre un canal que tiene un obstáculo sumergido. Las ondas que se envían desde la derecha llegan al horizonte del agujero (línea a trazos), donde el obstáculo alcanza su mayor altura. (S. Weinfurtner *et al.*, *Physical Review Letters* **106**, 021302 (2011))

sociedad. Incluso aceptando ese estado actual de desarrollo de la Física, **aún existen varios recodos de ésta que no podemos visitar con la ayuda conjunta de la teoría y experimentación.** Por lo menos, no con el mismo alcance. Es en ese caso cuando las analogías teórico-experimentales abren puertas para entender mejor aquellos fenómenos que aún se escapan de nuestra comprensión

Es bastante común el uso de analogías en Física para poder comprender fenómenos complejos. Un buen ejemplo de aquello es el usar un péndulo para entender, por ejemplo, como la forma en que las ondas superficiales en el mar se mueven. Galileo Galilei mostró que un péndulo tiene una frecuencia angular de oscilación proporcional a la raíz cuadrada del cociente entre la aceleración de gravedad y el largo del péndulo, que encontró al perturbar al péndulo cuando estaba detenido.

Sabiendo esto, podemos extrapolar lo que ocurriría en la superficie del océano si se pudiera levantar un volumen de agua de éste por sobre su nivel de reposo para luego soltarlo en presencia de la aceleración de gravedad. Al igual que en el péndulo, al perturbar la superficie del agua se produce una oscilación cuya frecuencia de oscilación será la raíz cuadrada del cociente entre la aceleración de gravedad y la distancia recorrida por la perturbación. **Construimos una analogía que nos permite entender el fenómeno undulatorio en la superficie del mar usando la oscilación del péndulo.** En nuestros días observar y medir las propiedades de las ondas en la superficie de un fluido es accesible en diferentes condiciones, pero en el tiempo de Galileo era bastante más difícil. Así, esta analogía permite que, usando las ideas y observaciones que emanan del estudio del péndulo, se puedan inferir propiedades y fenómenos en las ondas superficiales de gravedad.

Ahora, es posible usar analogías para entender otros fenómenos que escapan todavía la posibilidad de ser entendidos u observados completamente bajo el estado del arte actual en Física. En el caso de fenómenos undulatorios, el uso de la hidrodinámica como medio para su estudio mediante analogías ha cobrado recientemente relevancia por su versatilidad y rango dinámico espacio-temporal. Estos fenómenos van desde la dinámica de evaporación de agujeros negros a la generación de aislantes topológicos hasta la construcción de anomalías ópticas en redes de difracción. A pesar de tener nombres que suenan frases dichas por Montgomery Scott o escritas por Frank Herbert, estos fenómenos complejos pueden ser análogamente estudiados y observados de manera sencilla en laboratorio usando analogías hidrodinámicas adecuadas. Por ejemplo, W. G. Unruh y sus colaboradores desarrollaron una manera de estudiar la manera en que S. Hawking había predicho que un agujero negro (una región finita del espacio que genera un campo gravitatorio tan grande que ni la luz puede escapar de él) se “evaporaba” usando ondas superficiales de gravedad (las mismas que explicamos antes). Según Hawking, un agujero negro no es realmente negro, sino que emite radiación térmica (ondas electromagnéticas) con una temperatura proporcional a la masa del agujero. Al emitir radiación, este agujero se evapora, lo que trajo diversas preguntas a la teoría de Hawking. Unruh mostró que es posible realizar un análogo teórico a lo predicho por Hawking

usando ondas en la superficie del agua. Para Unruh, el agujero negro y lo que lo rodea puede ser representado unívocamente por... el cambio de profundidad de un canal con agua!. Así, enviando ondas contra la corriente de un flujo por la superficie del agua en un canal con un fondo variable, **Unruh pudo realizar teóricamente y medir experimentalmente un análogo clásico a la predicción de Hawking sobre que ocurriría cerca de un agujero negro.** Usando la misma idea, se pueden construir análogos hidrodinámicos a agujeros negros al dejar caer un chorro de agua sobre una superficie lisa, lo que genera una diferencia en la velocidad del flujo de agua y con ello un salto hidráulico. Es decir, podemos generar agujeros negros análogos en la cocina!. Este es un avance no menor en la teoría de la gravitación, más si se le compara con la posibilidad cierta de tener datos para cuantificar y teorizar esta radiación *in-situ*.

El uso de analogías hidrodinámicas permite observar y entender la dinámica de un fenómeno complejo en el tiempo y en el espacio al mismo tiempo. Esto es actualmente es difícil en diversos sistemas físicos, sino imposible (por ejemplo, seguir en el tiempo y en el espacio el movimiento de un electrón o de un conjunto de ellos a la escala atómica). En esa línea, un caso de particular interés actualmente es el de los aislantes topológicos: materiales que no permiten que las cargas se muevan libremente dentro de ellos, pero que si lo permiten por su superficie debido a propiedades de simetría particulares. No ha sido posible todavía observar en la naturaleza la manera en que los electrones se mueven por estos aislantes topológicos en tiempo real y a la escala atómica, pero si es posible desarrollar un análogo hidrodinámico de estos materiales para examinar sus propiedades. Recientemente, el grupo de B. Yang generó una analogía hidrodinámica a estos aislantes topológicos usando un fluido que rodea a un conjunto periódico de vórtices generados por cilindros contrarrotativos. Estos cilindros contrarrotativos generan un flujo entre ellos que afecta la propagación del sonido a través del fluido. Yang mostró que es posible “aislar topológicamente” la fuente emisora del sonido que se propaga a través del fluido mediante el giro de los cilindros. **Incluso, debido al sentido de giro de los cilindros es posible lograr que la onda de sonido pueda propagarse en una dirección privilegiada sin que sea reflejada por los cilindros, sin importar si existe algún grado**

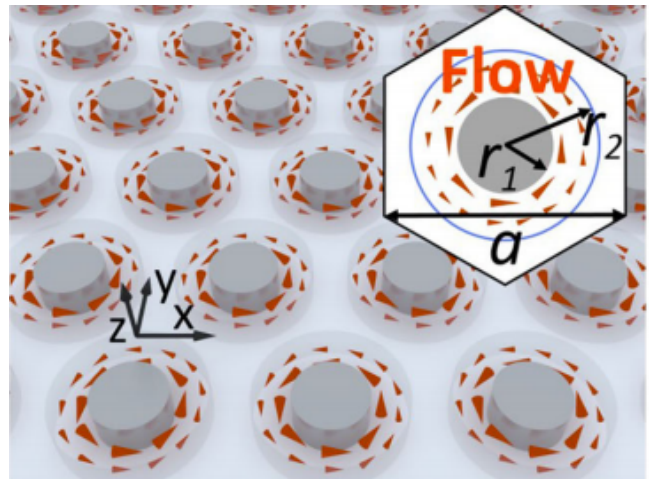


FIG 3: Análogo hidrodinámico a un aislante topológico usando un arreglo periódico de vórtices dentro de un fluido compresible. Los vórtices son generados por cilindros contrarrotativos. Al enviar una onda de sonido que interactúa con los vórtices a través del fluido, es posible “aislar topológicamente” la fuente de este, haciéndola invisible al sonido (Z. Yang *et. al*, Physical Review Letters **114**, 114301 (2015)).

**de desorden en su posición o si algún defecto en el arreglo de éstos apareciese.** Es directo entonces la posible aplicación médica, industrial e incluso militar de aislantes topológicos acústicos para generar materiales que sean sónicamente invisibles o que puedan rectificar el sonido.

Usar analogías hidrodinámicas permite que las escalas espaciales y temporales típicas pueden comprimirse o expandirse para poder observar la dinámica undulatoria tiempo real y a la escala del tamaño entre cilindros. Esto permite tener la posibilidad de observar un fenómeno de cerca (lo que llamamos *campo cercano*), como también desde lejos (lo que llamamos *campo lejano*), entregando información complementaria que en sistemas físicos no puede ser adquirida al mismo tiempo. Un ejemplo de esto es lo que ocurre en las llamadas anomalías ópticas en redes de difracción, donde la reflexión de una onda luminosa que incide en una red de difracción (una superficie con una rugosidad de periodicidad similar a la longitud de onda incidente) aumenta ostensiblemente para algunas longitudes de onda. Las anomalías ópticas en redes de difracción fueron observadas inicialmente por R. Wood a principios del siglo XX. Una explicación parcial a su existencia fue dada inicialmente John Strutt (Lord Rayleigh para los amigos) y completada luego por U. Fano. La explicación se basa en la interacción de la onda incidente con modos localizados undulatorios que decaen rápidamente (resonancias de Fano) o con modos extendidos que se propagan por la superficie de la



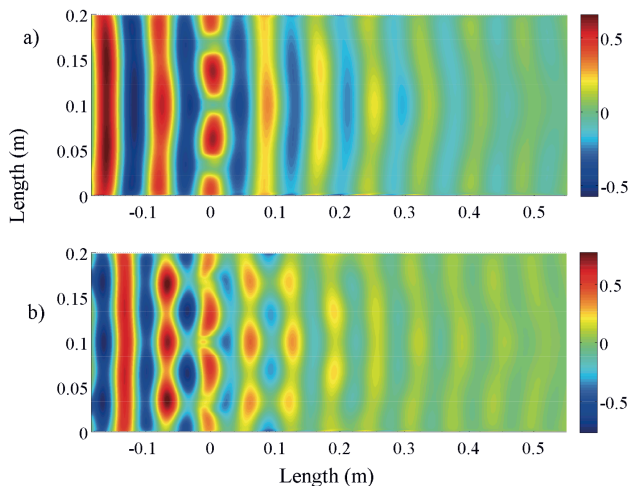


FIG 4: Análogo hidrodinámico a una red de difracción que desarrolla anomalías ópticas. Cuando la frecuencia es más baja, no hay onda transmitida con la periodicidad de la red. Cuando la frecuencia supera la frecuencia de resonancia, una onda con esa periodicidad es transmitida y la onda reflejada aumenta su intensidad. El mapa de colores muestra la amplitud de la onda (Tesis A Schmessane (2015)).

red de difracción (resonancias de Rayleigh). Estas anomalías han sido observadas en diferentes contextos electromagnéticos y son de tal importancia actualmente que se han transformado en un campo de estudio de la Física *per-se* llamada Plasmónica. Para el estudio de las anomalías ópticas se usa constantemente la medición en el campo lejano de la onda, es decir, se miden las propiedades de la onda reflejada por la red de difracción a una distancia mucho mayor a la longitud de onda de luz enviada. Esto no permite la posibilidad de observar el mecanismo de resonancia que genera la anomalías. Para poder observar y describir estos mecanismos de resonancia al mismo tiempo en que se observa el fenómeno en el campo lejano se puede usar una analogía hidrodinámica. En el Laboratorio de Materia Fuera del Equilibrio (LMFE) del DFI-FCFM de la Universidad de Chile, A. Schmessane construyó un análogo hidrodinámico a las ya mencionadas anomalías ópticas usando una onda superficial de gravedad (en el límite de aguas poco profundas) que incide sobre un arreglo unidimensional de obstáculos cilíndricos sumergidos en el fondo de un canal. Al enviar una onda con una longitud de onda similar a la periodicidad espacial del arreglo unidimensional, una perturbación localizada se desarrolla en torno a los obstáculos. **Esta perturbación se hace propagativa una vez que la longitud de onda se hace más pequeña que la periodicidad del arreglo de obstáculos, haciendo que la**

**intensidad de la onda incidente disminuya drásticamente.** Este es el mecanismo de las anomalías observadas: dos tipos de resonancias espaciales de la onda incidente una vez que su longitud de onda se acerca a la del arreglo de obstáculos, generando una perturbación localizada (resonancia de Fano) o una onda propagativa (resonancia de Rayleigh). Con este dispositivo experimental, Schmessane simultáneamente pudo estudiar como la dinámica local en el campo cercano (en torno a los obstáculos) afecta las propiedades de la onda reflejada en el campo lejano, algo que aún no es posible realizar en óptica.

El rango de aplicación de las analogías hidrodinámicas como medio de aproximación y validación de desarrollos teórico-experimentales en otros contextos es bastante amplio. Aún más, promete tener mayor injerencia en el futuro a medida que las herramientas teóricas y experimentales avanzan rápidamente, incluso más rápido que en otras áreas históricamente más fecundas de la Física. No es de extrañarse que prontamente nos sorprendamos con descubrimientos en Física basados en usar a la hidrodinámica como un catalejo científico.

Más información:

<http://relativity.livingreviews.org/Articles/lrr-2005-12/>

[http://en.wikipedia.org/wiki/Topological\\_insulator](http://en.wikipedia.org/wiki/Topological_insulator)

[http://www.springer.com/cda/content/document/cda\\_downloaddocument/9783642280788-c2.pdf?SGWID=0-0-45-1336210-PI74287160](http://www.springer.com/cda/content/document/cda_downloaddocument/9783642280788-c2.pdf?SGWID=0-0-45-1336210-PI74287160)

## Del autor

CLAUDIO FALCÓN



Profesor Asistente del DFI.

Licenciado y Magíster en Ciencias mención Física de la Universidad de Chile. Doctor en

Física de la Université Paris VI, Paris, Francia. Su áreas de especialidad son los sistemas fuera del equilibrio, la fluidodinámica y los medios granulares.