

Guión del programa de radio:

Un viaje desde lo microscópico hasta lo macroscópico: segunda parte, las escalas hidrodinámicas.

Rafael Delgado Buscalioni

Departamento de Ciencias y Técnicas Fisicoquímicas, UNED

Nota bene:

P= pregunta,

R= respuesta.

P: Antes de continuar con este viaje desde lo pequeño a lo grande, podrías hacer un recordatorio de las estaciones que visitamos en programa anterior?

R: Recordatorio:

Mecánica cuántica, métodos *ab initio* para determinar las nubes de probabilidad electrónicas

Femtosegundos 10^{-15}

Aproximación de Born-Oppenheimer--> núcleos estáticos. Obtención de fuerzas entre núcleos de los átomos a partir de la fuerza promedio generadas por los electrones de las últimas capas.

Pico-segundos, 10^{-12} segundos

Mecánica clásica atómica—(eliminamos a los electrones) fuerzas entre átomos dependientes de su distancia relativa, de los ángulos que forman (3 átomos) o del ángulo diédrico entre planos (4 átomos).

Nanosegundos 10^{-9}

Descripciones aproximadas (moléculas) agrupación de varios átomos adyacentes para establecer una unidad (grano-grueso). fuerzas de interacción suaves, descripción de partículas lennard-jones,

Cientos de nanosegundos hasta micro segundo

Eliminamos las moléculas de disolvente: disolvente implícito: partículas grandes (coloides o polímeros) en disolvente. El efecto colectivo de las colisiones de muchas moléculas del líquido con la partícula grande reducida a una fuerza aleatoria: Dinámica Browniana. Difusión de la partícula grande debida a las fuerzas aleatorias. Balance entre la viscosidad del fluido (resistencia al movimiento) y la amplitud del ruido (temperatura): Relación de fluctuación-disipación.

(aprox 5-10 min)

P= Bien, hemos recorrido un gran trayecto, que nos espera en la segunda etapa?

R= Hemos llegado a las escalas microscópicas, es decir las micras. Pero nos falta mucho hasta llegar a lo que podemos ver con nuestros propios ojos, porque 1 metro contiene un millón de micras.

La siguiente escala es la hidrodinámica: Esta comienza a ser importante a partir de las escala de las micras (e incluso a escalas menores) y su reino alcanza a todas las escalas superiores, centímetros, metros, kilómetros y más allá. Su origen radica en el movimiento colectivo y ordenado de muchas moléculas (a partir de, digamos miles de partículas hasta los millones y miles de millones de partículas y más...).

P=Una pregunta nos surge de inmediato. Has dicho *movimiento ordenado de miles o miles de millones de partículas!!* Como es posible!?, Las interacciones o fuerzas entre las partículas o moléculas de que estábamos hablando son importantes, o se escuchan, únicamente a distancias muy muy cortas, del orden de los nanómetros (es decir mil veces menores que una micra!).

Si lo llevásemos a nuestras escalas, es como decir que una conversación de dos señores en Sevilla vaya a afectar a un señor en Singapur!

R= Efectivamente. Así de largo es el alcance de las interacciones hidrodinámicas. De hecho se suelen denominar *interacciones de largo alcance*. El mundo que conocemos, nuestras experiencias cotidianas estás dictadas por este tipo de interacción.

P= Bueno, parece importante pues, explicar de que se trata.

R= Para entender el origen de la hidrodinámica, estudiemos primero su etimología: La palabra contiene el término **hidros** que significa agua (o fluido, en general) y la palabra dinámica que significa **fuerza** en griego.

Esta etimología nos va a ayudar a entender su significado físico, pero antes volvamos a el mundo observable por un momento, para enunciar y explicar un principio de *perogruyo* sobre el que descansa toda la hidrodinámica.

Este es el **principio de conservación**: A no ser que produzcamos o consumamos *algo*, La cantidad de *ese algo* se mantiene constante a medida que pasa el tiempo.

Esta aparente tontería empieza a tener más sentido físico si sustituimos ese “algo” por las cantidades que no se producen ni se destruyen en la naturaleza (al menos en la escala cotidiana): **masa, momento o energía**. Recordemos el famoso dicho: la energía ni se crea ni se destruye solo se transforma. Lo mismo se puede aplicar a la masa y el momento.

P= Si que parece una idea simple, podrías pones un ejemplo de como se aplica en la hidrodinámica?

R= En realidad este principio de conservación es fundamental en la física, no sólo en hidrodinámica. Voy a poner un ejemplo simple que además no servirá para establecer la primera de la ecuaciones de la hidrodinámica: la **ecuación de la conservación de la masa**.

Consideremos un volumen cerrado cualquiera dentro de un fluido. Como todas las leyes de conservación, la conservación de la masa se basa en la siguiente igualdad: El cambio de la cantidad de masa en el volumen por unidad de tiempo, es igual al gradiente (esto es variación) del flujo de masa en su interior.

Lo vamos a entender fácilmente con el siguiente ejemplo:

Pensemos que el fluido es una carretera llena de coches. La unidad de masa es un coche. Nuestro volumen cerrado será el trozo de carretera entre el km 0 y el km 1. En el Km 0 de la carrera los coches circulan a 100km/h, mientras que en el km 1 también. Como cambiará en el tiempo el número de coches en nuestro volumen?

Ciertamente, no cambiará; será constante pues como todos van a la misma velocidad; el flujo de coches que entran por el km 0 se compensa con el flujo de los que salen por el km 1.

Ahora, decidimos hacer una gran obra en la carretera, algo muy normal estos días. Así pues en el km 1 los coches tienen que ir muy muy lento. Que pasará con el número de coches (la masa) en nuestro volumen? Claramente aumentará constantemente, pues el flujo (velocidad) de los que entran es mayor de la de los que salen.

Así, hemos aprendido que la variación de masa en un volumen es proporcional a la diferencia del flujo en las fronteras del volumen. Además hemos visto que el flujo es proporcional a la masa que movemos y a la velocidad con que se mueve cruzando nuestro volumen.

Esto mismo es aplicable a cualquier otra cantidad que se conserva (es decir que no se crea ni destruye, sólo viaja): en concreto a la energía y a el momento.

P= Bueno, el ejemplo con la masa se entiende pues la masa es un concepto intuitivo, pero momento?, que es esto?

R= El momento, también conocido por **cantidad de movimiento** es una medida de la inercia de un cuerpo. Es decir, está íntimamente relacionado con la resistencia de un cuerpo a moverse o a cambiar de velocidad. Este concepto es mucho más importante que la velocidad, que todos conocemos. Y es muy intuitivo. Su valor numérico es la masa del cuerpo multiplicado por su velocidad.

Así, tiene mucho más momento un camión de diez toneladas moviéndose a 5 Km/hora que una moto de cien kilos moviéndose a 300 Km/h. Efectivamente, si ambos chocan contra una pared y se detienen de repente (por ejemplo cambian su momento a cero en 10 segundos) el camión causará más destrozos que la moto. Y no te cuento del pobre motorista.

Porque?, pues porque la fuerza que ejerce un cuerpo es igual a la rapidez con que cambia su momento. Es decir, la variación del momento dividido por el tiempo en que ese cambio ha ocurrido.

P= Muy bien, entendido. Pero como entra todo esto en la hidrodinámica.

R=Esta idea de fuerza es una idea central en la hidrodinámica, como ya dijimos. La hidrodinámica plantea una relación de igualdad entre causa y efecto, donde la causa (dinámica) es la fuerza (o fuerzas) y el efecto es el movimiento del fluido (hidros). Esta relación de igualdad entre causa y efecto (es decir lo que genera la causa está exactamente equilibrado con su efecto) lleva dentro el principio de conservación (la frase de Perogrullo de antes). Así de simple.

P= Has dicho que las cantidades que se conservan son la masa el momento y la energía. Y que como se conservan, pues solamente viajan, o se transportan de un sitio a otro. En el caso de la masa se entiende, se entiende, pero cómo se transporta, por ejemplo, el momento.

R= Esta es una pregunta muy importante pues entra de lleno en la forma peculiar de

comportamiento de los fluidos, que los diferencia de los sólidos, en concreto. Entramos de lleno en la hidrodinámica, y en particular en los denominados **fenómenos de transporte hidrodinámicos**.

Para comenzar a explicar cuales son las formas de transporte en hidrodinámica retomemos en primer lugar la idea de fuerza, la dinámica. Supongamos que ejercemos una fuerza en un punto cualquiera de un sólido. Éste se moverá como un todo a la vez, sin deformarse (o muy muy poco, al menos). Todos sus átomos sentirán casi instantáneamente la misma fuerza y se moverán en la misma dirección. Hagamos lo mismo en un fluido, por ejemplo, moviendo muy lentamente la cucharrilla en nuestro café. ¿Qué observamos? Ciertamente la zona cerca de la cuchara se mueve más rápidamente que las zonas distantes a la perturbación de la cuchara. Al contrario que el sólido, el fluido tarda un cierto tiempo en comunicar la fuerza puntual a regiones distantes. Como consecuencia, el fluido reacciona con movimientos relativos internos, es decir con diferencias de velocidad de un punto a otro. Se deforma.

Y al deformarse, el fluido ejerce una fuerza contra la cuchara. Un esfuerzo en contra del movimiento que se denomina **esfuerzo viscoso**. Esta fuerza es proporcional a la superficie de la cuchara y también, y muy importante, a la rapidez con que deformamos el fluido. Es decir, si movemos la cuchara rápidamente, deformaremos más el fluido y por ello nos costará mayor esfuerzo que si la movemos lentamente. Por otra parte esta fuerza depende del fluido que consideremos, y este factor se denomina **viscosidad del fluido**. Ciertamente, cuesta más mover un fluido más viscoso (como el agua) que otro poco viscoso (como el aire).

P= Bien, y ¿cómo se relaciona esta viscosidad con el transporte de momento y con su conservación, de la que antes hablamos?

R= Para entender como se transporta el momento mediante los esfuerzos viscosos, bajemos ahora al mundo de las moléculas. A las pequeñas escalas. Esto nos permitirá entender el transporte por difusión. Esta forma de comunicación entre moléculas muy lejanas entre sí es muy general y puede transmitir, no solamente el momento, sino energía.

Como dijimos, las moléculas interaccionan (o si quieres “colisionan”) entre vecinas próximas, a distancias muchísimo más pequeñas que una taza de café. ¿Cómo es posible que una perturbación puntual se comunique en a las moléculas de toda la taza? Para entenderlo haré otra analogía. Pero antes, tengamos en cuenta que en una colisión entre dos moléculas, ambas intercambian momento. La que tiene mucho movimiento cede parte de su movimiento a la que tiene menos. Sin embargo, el momento total antes y después de la colisión se conserva, como dijimos. Una analogía perfecta sería el intercambio monetario. Supongamos que existe un espíritu de solidaridad entre humanos tal que, cualquier persona rica que se encuentre con una pobre, siempre le cede dinero.

En la analogía: las personas son las moléculas y su dinero es su cantidad de movimiento: de hecho, el dinero se conserva también (si lo das lo pierdes, y el otro lo gana). Supongamos ahora que en una zona del país la gente se hace rica de repente (la cuchara mueve el café en un punto). Lo que ocurrirá es bien claro, los ricos de la región fronteriza que se encuentren con sus vecinos pobres, les cederán parte de su dinero, haciendo más ricos a sus vecinos pobres. Pero pasado un tiempo los pobres cercanos a los ricos, serán tan pudientes que comenzarán a ceder dinero a la siguiente región vecina, más distante y aún mas pobre. Pasado suficiente tiempo todo el mundo tendrá aproximadamente el mismo dinero y los intercambios (las colisiones) serán igualitarias. No existirán zonas ricas y pobres: es el equilibrio.

Aunque tenga mucho de utopía, esta analogía explica perfectamente el transporte por difusión de las magnitudes conservadas en la naturaleza. En efecto, el proceso de difusión estabiliza, conduce al

sistema a su equilibrio termodinámico, en el que no existen diferencias entre regiones vecinas. En segundo lugar el proceso parte de una pequeña región y se propaga en todas direcciones de tal modo que la frontera por donde se propaga (su superficie) aumenta con el tiempo. Esto es muy importante, pues a medida que pasa el tiempo, la frontera aumenta de superficie y el proceso se hace más lento. Simplemente porque hay más gente a la que repartir en la frontera. Por otra parte la rapidez del proceso depende de la viscosidad dinámica: una propiedad de cada fluido que se entiende como su capacidad de transmitir momento. Es decir fluidos más viscosos reparten más rápido el momento (en nuestra analogía, los fluidos poco viscosos son más tacaños).

P= Así pues la difusión de cualquier cosa cuya cantidad total está fijada de antemano es un transporte que elimina las diferencias y conduce al equilibrio. Bonito, pero... no existen otros modos de transporte de momento, menos solidarios, o menos estabilizantes?

R= Sin duda, de lo contrario todo sería muy aburrido y no podríamos estar hablando hoy por la radio, o al menos nadie nos podría escuchar. Y para demostrarlo vamos a hablar de otra forma de transporte de momento: las diferencias de presión, que dan lugar al **modo sónico**, o al sonido.

La presión (la fuerza por unidad de superficie) que hace cada trocito del fluido a sus regiones vecinas aumenta sobre todo con la densidad de masa que contiene (y en menor medida con su temperatura). Si existen diferencias de presión entre regiones vecinas del fluido, la región con mayor presión empuja a la región vecina y genera un movimiento en el interior del fluido.

Esto no tiene nada que ver con el ejemplo de la cuchara en el café. Veamos que pasaría si en lugar de mover una cuchara, comprimimos una pequeña región del fluido. Por ejemplo voy a comprimir ahora mismo el aire entre mis dos manos para aumentar su presión:

(doy una palmada)

Estoy seguro que tú has escuchado el resultado de esta palmada. Eso es porque el momento que ha generado el salto de presión del aire entre mis manos se ha transmitido rápidamente hasta tus orejas. Esta forma de transmisión, llamada sonido, surge de la relación entre la densidad y la presión.

P= Creo que se entiende, ¿pero cuales son las diferencias con respecto a la difusión?

R= La primera gran diferencia es que las diferencias de presión dan lugar a un transporte de momento en una única dirección: desde el punto con mayor presión a el de menor presión. Por el contrario la difusión es un proceso que se propaga a través de la superficie, y por tanto menos efectivo a la hora de transmitir. Es por esto por lo que has escuchado tan rápido mi palmada. Una diferencia de presión (o densidad) en un punto da lugar a una onda que viaja a velocidad constante (mientras que la velocidad de la difusión se hace más pequeña a medida que pasa el tiempo).

El efecto en las moléculas es muy diferente también. Además el transporte de sonido está relacionado con la conservación de la masa. Al comprimir un punto, necesariamente tenemos que llevarnos moléculas de alrededor, haciendo que la región vecina tenga menos densidad. (Esto es debido a la conservación de la masa, por cierto). Las moléculas en la región comprimida colisionan entre ellas mucho más a menudo y por ello rápidamente muchas de ellas son expulsadas a la región vecina, donde la densidad era menor. El proceso es tan rápido que la región vecina se llena de moléculas y aumenta sobremanera su densidad, y su presión. La región inicialmente comprimida se vacía. Tenemos ahora la misma situación, salvo que ahora las moléculas de la segunda región son

expulsadas en todas direcciones, llenando la primera y también a la tercera región. La onda de momento comienza así a propagarse a regiones más lejanas, y hasta tu oreja.

P= Y a que velocidad se propaga?

Bueno eso es fácil. La onda irá más rápido si la fuerza de repulsión entre regiones vecinas es mayor. Esta fuerza será proporcional a cómo aumenta el salto de presión con el salto de densidad. Si dividimos el salto de presión y el salto de densidad obtenemos la velocidad del sonido (al cuadrado). Este cociente es una propiedad intrínseca del fluido, que viene dada por su ecuación de estado. Así en aire el sonido viaja a unos 300 m/h, mientras que en agua a unos 1500 m/h (por eso las ballenas se comunican rápidamente a largas distancias).

P= Interesante, entonces las diferencias de presión transportan movimiento de manera muy eficaz, es decir casi como un rayo.

R= Si, buena observación, podemos hablar de rayos de sonido, como podemos hablar de rayos de luz. Esto es así porque (matemáticamente) ambos son ondas del mismo tipo.

P= Y... ¿Existe alguna otra forma de transporte direccional que no sea una onda?

R= Por supuesto, y con esto acabamos las formas de transporte de momento. Hasta ahora hemos hablado de formas de transporte originadas por fuerzas, recordemos nuestro término “dinámica”. Se me ha olvidado el término “hidro”; algo que no debemos olvidar pues proporciona una forma de transporte peculiar de los fluidos. Al fin de al cabo, las ondas de presión (sonido) también están presentes en los sólidos y el fenómeno de difusión es aún más general que la hidrodinámica (recordemos la dinámica Browniana del programa pasado).

Esta forma de transporte peculiar de los fluidos es la **convección**. La convección es una consecuencia, un efecto de las fuerzas que mueven el fluido, deformándolo y generando diferentes velocidades en puntos distintos. Por ello lo he asociado con el término *hidro* y no con el *dinámica*. Sin embargo, aunque sea una consecuencia de las fuerzas relativas entre puntos del fluido, la convección genera movimiento y también fuerzas. Esta aparente paradoja se comprende fácilmente si entendemos que las fuerzas de convección son **fuerzas de inercia**. Las fuerzas de inercia son las que te empujan de repente en un autobús que se detiene súbitamente y te hacen colisionar con la señora de al lado. En realidad dentro del autobús nadie te ha empujado (ni la cuchara, ni la palmada, ni nada). La inercia es una **fuerza ficticia** que surge del movimiento relativo de las partes (tu y el autobús), pero dígame usted eso a la pobre señora con que chocaste y que perdió su compra por el suelo. Del mismo modo, cuando un trozo de fluido se detiene súbitamente (por algún obstáculo) o se acelera súbitamente (por una eyección, o por una fuerte diferencia de presión) choca contra su región vecina y la mueve consigo. Es decir, transporta su momento hacia la región donde se dirige, y con una velocidad igual a la que se está moviendo.

Vemos que la convección es también un transporte direccional, pero no es una onda.

Algo muy importante de la convección es que no es solamente una fuerza. Es decir no sólo es capaz de comunicar momento, sino cualquier propiedad del fluido, a regiones distantes. También energía y cualquier otra propiedad. Ciertamente ese trozo del fluido que se acelera se lleva consigo lo que tiene y lo deposita (por ejemplo, por difusión) donde quiera detenga. Es como si en nuestra comunidad de ciudadanos solidarios, en lugar de dar dinero en mano a cada vecino de enfrente; se

montasen en un camión con su dinero y se fuese a la región más distante y más pobre (o a cualquier otra) para repartirlo. El intercambio sería menos gradual y desde luego generaría mayores diferencias entre regiones. Así pues, otra propiedad importante de la convección es que es capaz de generar desequilibrio, o como dicen los “fluidistas”, inestabilidades hidrodinámicas.

Esto contrasta con la difusión, que como vimos, estabiliza.

P= Ah, entonces hay transportes estabilizantes como la difusión y desestabilizantes como la convección.

R= En efecto, y de la interacción entre todos estos tipos de transportes que hemos explicado surgen estructuras de muchos tamaños diferentes, y dinámicas complicadas; tanto como las que podemos ver en un río con fuerte torrente, o en la atmósfera. Esta interacción entre formas de transporte es de gran belleza, y se estudia en la dinámica de fluidos no-lineal, y en turbulencia.

Sin embargo, todo eso podría dar para varios programas y creo que no tenemos mucho más tiempo.

P= CIERRE DE PROGRAMA....A modo de conclusión

R= En un sistema aislado (sin contacto con el exterior) existen magnitudes que se conservan momento, masa, y energía.

La hidrodinámica trata sobre como se transportan estas cantidades en un fluido.

Al ser conservadas, la hidrodinámica es capaz de comunicar efectos locales en un punto del fluido a regiones muy distantes, en comparación con las escalas moleculares. Esto es, son interacciones de largo alcance.

En cuanto al movimiento, existen tres formas de transporte: por difusión, por diferencias de presión (esto da lugar al sonido) y por convección.

En un próximo programa espero poder hablar de cual es el efecto de estas interacciones de largo alcance en la dinámica y el movimiento de grandes moléculas, como polímeros o coloides inmersos en el fluido. Algo de gran trascendencia en numerosos contextos, empezando por nuestro propio cuerpo, que está lleno de líquido.