

Describiendo lo **irreproducible**

En el homenaje que recibió al ser nombrado caballero, en 1931, el distinguido científico inglés Sir Horace Lamb inició su intervención con estas palabras: "Cuando yo muera, y suponiendo que voy al cielo, espero ser iluminado sobre dos cosas: la teoría de la turbulencia y la electrodinámica cuántica. Sobre esta última soy bastante optimista". Sospecho que tuvo razón, puesto que sobre la última todos fuimos iluminados cuando en forma independiente R. Feynman, J. Schwinger y S. Tomonaga formularon la teoría en los años sesentas. De la primera seguimos bastante en ascuas, y probablemente Lamb comparte la frustración, aunque goce de otras ventajas.

La electrodinámica cuántica es la teoría que integra

la mecánica cuántica con el electromagnetismo clásico, y es probablemente la teoría más precisa que se haya formulado en la física. La primera estableció, en los inicios del siglo xx, durante tres décadas, los fundamentos de la física atómica con un aparato matemático y conceptual profundamente novedoso. La segunda, terminada por J. C. Maxwell en 1873, configuró la teoría completa del comportamiento eléctrico y magnético de la materia, predijo la existencia y el comportamiento de las ondas electromagnéticas y sembró la semilla de la teoría de la relatividad especial.

El problema de la turbulencia, el reto más notable de la física clásica, específicamente de la mecánica de fluidos, consiste en formular una teoría matemática que permita

predecir el comportamiento de un fluido (apellidado de líquidos y gases) en cualquier circunstancia, particularmente cuando es forzado de modo tal que parece responder en forma caprichosa e irrepetible. Las aguas azul turquesa que mutan en espumas blancas cuando las olas rompen en la playa, el chorro de agua cristalina que sale de la llave cuando se abre totalmente y choca con el fondo arremolinándose hacia el drenaje, el humo que sale de un cigarro formando una curva suave que pronto se enmadeja llenándolo todo, y las explosiones volcánicas, son manifestaciones del fenómeno; es accesible a todos, común, milenario, fácilmente producido en un laboratorio si no se quieren usar los muebles de cualquier baño quitándole *g/a-*

Ramón Peralta Fabi



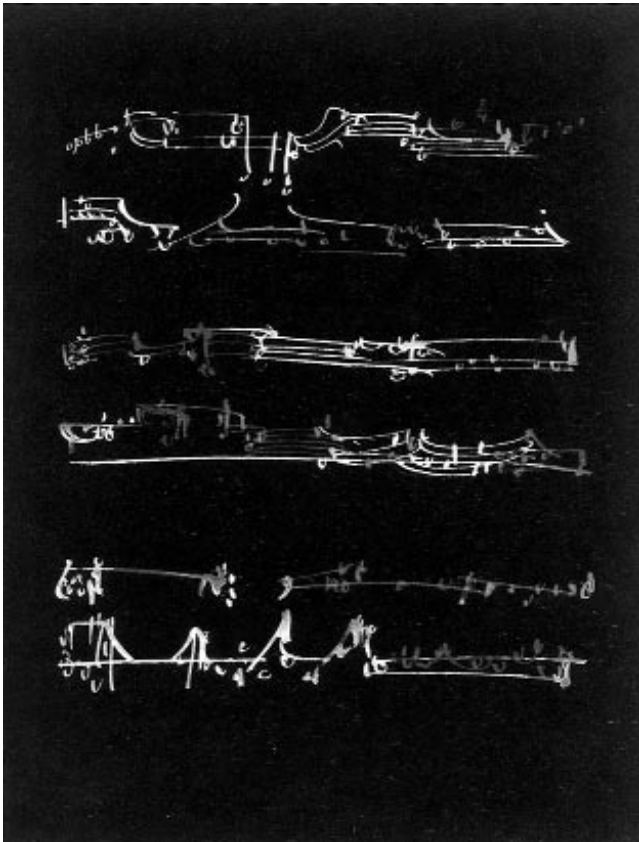
mour al estudio. Sin embargo sigue desafiando nuestros esfuerzos por encapsularlo en una fórmula.

Después de todo, es más atractivo meditar sobre los puntos brillantes que vemos en una noche constelada o reflexionar en torno a la sección eficaz de dispersión de un neutrino solar, que hacerlo sobre las rápidas y complicadas variaciones de la presión en un recodo del drenaje urbano. Por otro lado, entender esto último abriría la puerta a la resolución de innumerables

problemas básicos y aplicados en las más diversas disciplinas de la naturaleza, como las gigantescas estructuras en las nebulosas planetarias, el diseño óptimo de sistemas de enfriamiento industrial y doméstico, las celdas de convección en el Sol, prototipo de la dinámica interna de la mayoría de las estrellas, las coloridas formas en las bandas de Júpiter, y la cambiante imagen atmosférica que determina el clima de nuestro planeta; también entenderíamos las olas, las nubes y las

estelas, los vertederos en las presas y los rápidos en los meandros de los ríos, mejoraríamos los diseños de los grandes sistemas de riego o de las válvulas cardíacas, el transporte por ductos de polvos suspendidos, de gases combustibles o de malolientes aguas negras, o controlaríamos más adecuadamente a los superfluidos a $-270\text{ }^{\circ}\text{C}$ o a hidrocarburos pesados en las torres de destilación de la industria petroquímica.

Cabe hacer notar que los fluidos más comunes están



descritos por unas ecuaciones, llamadas de Navier-Stokes y sustentadas en los principios de conservación de la masa, el *momentum* y la energía, que contienen toda la información sobre su comportamiento dinámico. Es decir, la solución de estas ecuaciones determina la velocidad y la presión del fluido en cuestión en cada punto del espacio y a todo tiempo; hasta ahora nada sugiere que estas afirmaciones sean incorrectas. La dificultad radica en que no sabemos resolver las ecuaciones salvo en ca-

sos sumamente sencillos y en que todo indica que inunca podremos hacerlo para un caso genérico!

¿Qué hace tan escurridizo el problema? Además de ser esta la naturaleza de los fluidos, cualquiera que se nos ocurra –el aire o el agua son suficientes para ilustrar cualquier acto circense de la familia–, lo es el irregular y complicado modo de responder que tienen. Imaginemos un experimento, uno sencillo que muestre las características típicas. Agua pura que fluye por un tubo largo, horizontal y transparente; por un lado está conectado a un tinaco grande que surte el agua y por el otro sale a un recipiente vacío.

Todo está inicialmente en reposo. Abrimos una llave y un tiempo preciso después empezamos a medir la velocidad en el centro del tubo, digamos una medida cada segundo. Tomamos unas mil lecturas y cerramos la llave. Esperamos varios días y repetimos la experiencia. Cuidamos la temperatura, la luminosidad, la pureza del agua, la operación del instrumento de velocimetría y todo lo que se nos ocurra; tratamos de que sea con el mismo entusiasmo en cada ocasión. Comparamos las tablas de datos y, contra nuestras más caras expectativas, los datos no coinciden!

Hay varias explicaciones,

desde luego. Un grupo de éstas supone, palabras más, palabras menos, que el Señor juega con nosotros, influyendo sobre el movimiento de las aguas para hacerlas inaccesibles a la arrogancia humana. Otro grupo contiene aquellas que prefieren buscar explicaciones revolucionarias y una nueva forma de interpretar el mundo, partiendo desde el principio; ocasionalmente necesario, es poco eficiente si primero no se agotan las posibilidades de la teoría que ya ha probado ser útil en otras circunstancias. Este último ha sido el camino, infructuoso hasta ahora, que se ha seguido para abordar el problema. En estos términos es preciso revisar más de cerca las misteriosas tablas de datos; algo debe haber en común entre ellas, pues se trata del mismo sistema físico sujeto a condiciones semejantes, ya que nunca son idénticas. De acuerdo con el principio de-causalidad, según el cual a igual causa, igual efecto, lo que comparten los experimentos probablemente está oculto y las diferencias aparentes son debidas a que los experimentos no se repiten exactamente igual.

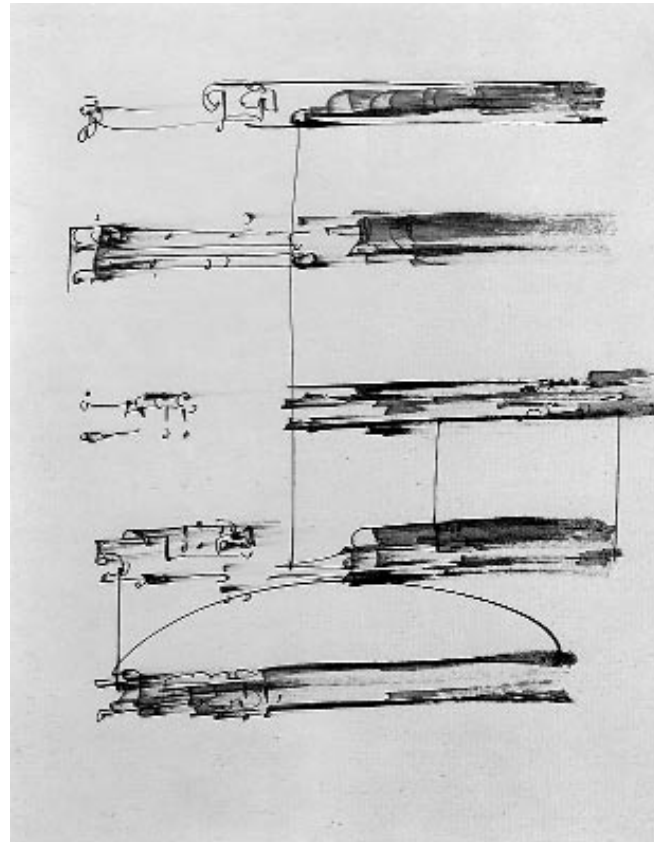
La notable variabilidad de los datos sugiere la solución: el resultado del experimento refleja una dinámica complicada subyacente, cuyas

características estadísticas están contenidas en los datos, lo cual hace necesario un lenguaje esencialmente probabilístico. Si se calcula el valor promedio de cada grupo de datos (se toma el primer *momento*), sumando los mil datos de velocidad en cada tabla y dividiendo el resultado por mil, se encuentra que el resultado es casi el mismo número; más parecido es cuanto mayor sea el número de datos de cada experimento. Si se calcula el segundo *momento*, también conocido como la varianza, haciendo una aritmética un poco más elaborada nuevamente aparece un número común a cada experimento y así sucesivamente. En otras palabras, cada experimento tiene exactamente las mismas características estadísticas. Se dice entonces que comparten la misma función de distribución. El problema ahora se ha trasladado a determinar la ecuación que la contiene o cuya solución es esta función. Conocida ésta, pueden calcularse teóricamente todos los *momentos* y tener la solución del problema; equivalentemente,

si se conocieran todos los momentos (un número infinito de ellos) podría determinarse la función. De las ecuaciones de Navier-Stokes, que son sólo cuatro, pueden construirse las ecuaciones que satisfacen los distintos *momentos*; al conjunto (infinito) de éstas se le llama la jerarquía de Friedman-Keller. Visto así, el problema fue formulado hace más de 75 años y los esfuerzos han logrado resultados valiosos aunque exigüos, si bien hay cosas esenciales que ahora se entienden mucho mejor, particularmente a la luz de la teoría de los sistemas dinámicos.

Por ejemplo, hoy sabemos que los fluidos satisfacen una teoría que se caracteriza por tener lo que se conoce como dependencia sensible de las condiciones iniciales. Esto explica porqué en cada realización de un experimento aparentemente igual los resultados son distintos, al menos a simple vista.

En nuestro ejemplo las moléculas del agua están posicionadas y se están moviendo de modo diferente en cada realización del experimento; por mencionar algo trivial, aunque cierto. En este sen-



tido, cada realización de un experimento sobre un flujo turbulento es irreproducible.

Es probable que se hayan publicado más trabajos de investigación sobre el tema de la turbulencia que sobre cualquier otro problema en física. Entre muchos otros, Einstein, Heisenberg, Kolmogorov y Feynman también reflexionaron sobre el problema. Hoy