



Los aplausos de cientos de espectadores tras un concierto empiezan sonando de forma caótica y suelen terminar acoplándose. La sincronización emerge de forma espontánea. ESTHER CASAS

SINCRONIZACIÓN > LA FÍSICA DE LOS A

LA DANZA LUMINOSA DE LAS LUCIÉRNAGAS, LA COHERENCIA DE LOS LÁSERES, LOS CHIRRIDOS DE LOS GRILLOS, LOS APLAUSOS EN UN CONCIERTO, LOS LATIDOS DEL CORAZÓN... ¿QUÉ TIENEN EN COMÚN FENÓMENOS TAN DISPARES? TODOS ELLOS MUESTRAN LA APARICIÓN ESPONTÁNEA DE SINCRONIZACIÓN, DE ORDEN TEMPORAL. Y LOS FÍSICOS ESTÁN DESVELANDO SU CONEXIÓN EN CLAVE MATEMÁTICA: CÓMO LA AUTO-ORGANIZACIÓN GENERA EMERGENCIA ESPONTÁNEA DE ORDEN A PARTIR DEL CAOS.

TEXTO **BARTOLO LUQUE**

> **PÉNDULOS A DÚO** El físico Christiaan Huygens (1629-1695) tenía en una pared de su dormitorio dos relojes de péndulo de su propia invención. En febrero de 1665, convalecía de una gripe en su cuarto. Mientras los miraba aburrido, se dio cuenta de que los péndulos de ambos relojes estaban perfectamente sincronizados. Huygens sabía que era prácticamente imposible que ambos péndulos oscilaran exactamente igual por azar. Y eso llamó poderosamente su atención. Es más, era casi imposible que se mantuvieran así durante mucho tiempo. Los observó durante horas y ambos relojes seguían sincronizados. De modo que supuso que, de alguna manera, los relojes estaban interaccionando. Huygens intuyó que eran las vibraciones que se transmitían por la pared donde ambos relojes estaban colgados. Colocó uno de los relojes en el otro extremo de la habitación y, al poco tiempo, ambos se desincronizaron. El acoplamiento de los relojes a través de la pared generaba la sincronía o sincronización entre ellos.

A partir de la observación fortuita de Huygens, los científicos han desarrollado toda una rama de la Matemática aplicada y la Física: la teoría de los osciladores acoplados. Gracias a ella han sido capaces de explicar por qué la Luna, en su órbita alrededor de la Tierra, nos muestra siempre la misma cara (hoy día, el periodo

de rotación de la Luna coincide con su periodo de traslación alrededor de la Tierra). O entender fenómenos como la superconductividad, algo así como electricidad sin resistencia, donde quienes se acoplan son parejas de electrones. O inventar la luz láser, donde trillones de átomos acoplados pulsan en concierto emitiendo fotones con la misma frecuencia y fase.

OSCILADORES ACOPLADOS En la observación de Huygens, cada reloj era un oscilador, un péndulo. Como la precisión de sus mecanismos todavía no estaba muy desarrollada, cada uno exhibía una frecuencia de oscilación apreciablemente distinta. Es decir, cada péndulo realizaba un recorrido de ida y vuelta en un tiempo ligeramente diferente. La pared era el medio a través del cual los osciladores estaban acoplados. La oscilación de uno de los péndulos provocaba una vibración que, transmitida por la pared, era sentida por el otro, y viceversa. El resultado del acoplamiento entre ambos fue la sincronización. Ambos péndulos acababan haciendo su recorrido de ida y vuelta en el mismo tiempo, con la misma frecuencia. Acababan oscilando al unísono, al compás. Y no sólo eso, sino con la misma fase.

Suponga que está corriendo en una pista circular a velocidad constante. Para un físico se acaba de convertir en un oscilador. El

número de vueltas que puede hacer por hora es su frecuencia. Ahora imagine a un compañero o compañera que corre exactamente a su misma velocidad. Tiene por tanto su misma frecuencia, da el mismo número de vueltas en una hora. Pero puede estar corriendo por detrás de usted, a cierta distancia. Los físicos dicen entonces que poseen distintas fases. Tendrían la misma fase si estuvieran corriendo uno junto al otro.

Imagine ahora un grupo de amigos corriendo en esa pista circular. Algunos corren rápido, tienen frecuencias altas, y otros lo hacen despacio, exhiben frecuencias bajas. Como están desperdigados por la pista, sus fases son distintas. Si todos desean correr juntos para mantener una conversación, los rápidos empezarán a ir más despacio y los lentos un poquito más deprisa, hasta que todos llegan a un compromiso de frecuencia y ajustan todas sus velocidades a una sola en el punto de encuentro, es decir, con la misma fase. Ese compromiso, que en nuestro ejemplo se produce por la voluntad de los corredores, se da, como han descubierto los físicos, en muchos sistemas naturales de osciladores acoplados bajo ciertas condiciones muy generales.

BARTOLO LUQUE PERTENECE A LA ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS AERONÁUTICOS DE LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID



APLAUSOS

SINCRONIZADOS DE MODO NATURAL

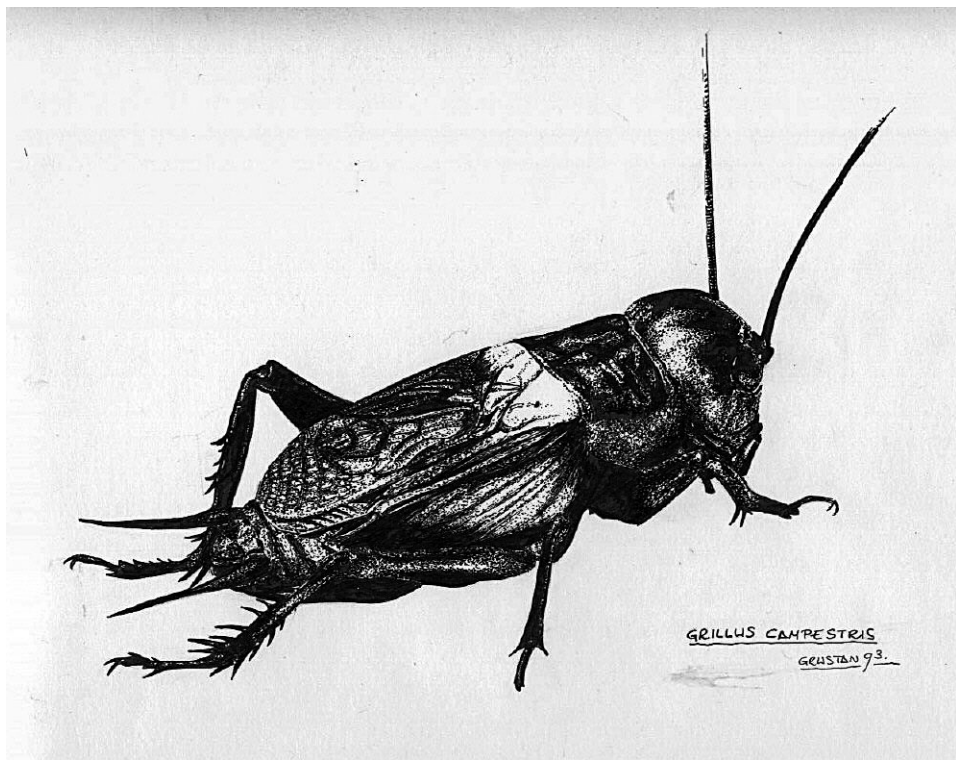
■ La tendencia a la sincronización en la Naturaleza ha llamado poderosamente la atención de los biólogos. Un caso espectacular es el de las luciérnagas macho, que son capaces de emitir pulsos de luz. Cada luciérnaga posee una especie de oscilador cuya frecuencia se ajusta en respuesta a los flashes de otros congéneres. Los machos se juntan por miles y logran sincronizar sus frecuencias para emitir un pulso de luz rítmico con la intención de llamar la atención de las hembras a larga distancia. Algunas noches, a las orillas de los ríos de Malasia, miles de luciérnagas enamoran con un espectáculo de luces rítmicas. Un efecto hipnótico-auditivo parecido al que nos causan los grillos de nuestros campos cuando cientos de ellos sincronizan sus chirridos.

Aunque parezca una leyenda urbana, los periodos menstruales de mujeres que pasan mucho tiempo juntas bajo ciertas condiciones pueden sincronizarse; existen modelos matemáticos que lo explican. La próxima vez que vean en un documental espermatozoides desplazándose febrilmente hacia un óvulo, observen cómo nadan perfectamente al compás. ¡Eso sí que es natación sincronizada! Y es que nosotros mismos estamos formados por miles de osciladores acoplados. Nuestros ciclos circadianos (ciclos biológicos sincronizados con el día y la noche: sueño-vigilia, variación de temperatura corporal, tono muscular...), nuestras ondas cerebrales o muchos de nuestros procesos nerviosos están regidos por el acoplamiento de osciladores. El caso más ilustrativo es nuestro corazón. El tejido cardíaco está formado por

miles de células musculares capaces de oscilar. Cada una oscila con su propia frecuencia, como ocurría con los relojes de Huygens, pero gracias a que están acopladas logran prodigiosamente sincronizar sus oscilaciones, hasta el extremo de poder escuchar su oscilación colectiva como un latido bien definido. Lo interesante es que en el tejido cardíaco no existe una célula líder que marque el ritmo a las demás. Si fuera así, el mal funcionamiento o la muerte de esta célula jefe significaría un paro cardíaco fatal. La evolución ha optado por un sistema democrático, distribuido: ninguna célula lidera el proceso, los latidos son un resultado colectivo, la auto-organización del conjunto por el acoplamiento de osciladores.

Si bien las ecuaciones que describen un oscilador y su comportamiento son sencillas, las posibilidades dinámicas de dos o más osciladores acoplados resultan todavía hoy intratables matemáticamente. Sin embargo, en los últimos años, a partir de los trabajos pioneros de investigadores como Charles S. Peskin, Arthur T. Winfree o Yoshiki Kuramoto, se han producido notables avances. Se debe en gran parte a las posibilidades que brindan los modelos por ordenador y a los intereses compartidos, bajo el nombre de Ciencias de la complejidad, por físicos, matemáticos y biólogos desde hace un par de décadas. Quizás el descubrimiento reciente más importante bajo esta nueva orientación haya sido la inesperada conexión entre la sincronización en muchos sistemas biológicos y las transiciones de fase bien conocidas de la Física estadística.

CÓMO USAR UN GRILLO COMO TERMÓMETRO



Dibujo de un ejemplar de grillo campestre, un animal que, frotando sus alas, produce un chirrido característico que tiene por función atraer a las hembras. Los grillos actúan como osciladores acoplados y sincronizan sus chirridos. DANIEL GRUSTÁN

> **LA CANCIÓN DEL VERANO** El grillo campestre (*Grillus campestris*) es el cantautor que más escuchan los españoles en verano. Su chirrido es inconfundible. Consiguen chirriar o grillar gracias a sus alas. En ellas disponen de una nervadura en forma de dientes de sierra y, frotándolas, producen ese característico “cric-cric”.

Los grillos son osciladores que, como los diapasones, podemos escuchar. Semejante al caso de las luciérnagas, las serenatas nocturnas de los grillos intentan atraer a las hembras. De hecho las hembras no tienen la capacidad de producir el sonido. Y, al igual que las luciérnagas, los grillos sincronizan sus chirridos, como hemos comprobado muchas veces, actúan como osciladores acoplados.

Como mucha gente que vive en el campo sabe, los grillos incrementan la frecuencia de sus chirridos con la temperatura. Lo que no es tan conocido es que, de he-

cho, lo hacen de forma tan precisa que se pueden utilizar como termómetros. Un caso que ha sido bien estudiado es la frecuencia del “cric” de un pequeño grillo americano, el *Oecanthus fultoni*. Si contamos el número de “crics” de un grillo de esa especie en 7 segundos y sumamos 5 nos dará la temperatura a la que se encuentra. En el caso de nuestro grillo campestre, los números serán ligeramente diferentes, pero su chirrido es suficientemente lento y claro como para contarlo sin problemas. Es un experimento que cualquiera puede hacer durante sus vacaciones de verano en el campo.

VELOCIDAD DE REACCIÓN Y TEMPERATURA ¿Por qué los grillos funcionan como termómetros? En general, las reacciones químicas se producen más rápidamente a mayor temperatura. Fue el químico-físico suizo Svante Arrhenius quien, en 1889, dedujo la expresi-

ón matemática que relaciona la velocidad de reacción y la temperatura a la que se produce. Los grillos, como todos los organismos, son enormes contenedores de reacciones químicas que llamamos metabolismo. Como los grillos no auto-regulan su temperatura corporal como los mamíferos, la velocidad de sus reacciones metabólicas depende de la temperatura ambiente. En cierta manera, el chirrido de los grillos es una demostración macroscópica de la ecuación de Arrhenius.

A una temperatura dada, cada grillo emite en una frecuencia ligeramente diferente. Cuando un conjunto de ellos entra en sincronía por acoplamiento, se consigue una frecuencia consenso. Curiosamente, el ajuste lineal con la temperatura del que hablábamos unas líneas más arriba se sigue entonces de forma más exacta. Se trata de un maravilloso ejemplo de lo que los estadísticos llaman “regresión a la media”.

OVACIONES

> **TODOS A UNA** Recientemente, físicos de varias universidades de Rumanía, Hungría, Francia y EE UU se han propuesto estudiar cómo emerge abruptamente la sincronización de la cacofonía inicial de cientos de aplausos en un concierto. Se trata de un divertido fenómeno de auto-organización social que todos hemos presenciado alguna vez. Observemos que, al aplaudir, cada espectador actúa como un oscilador y está acoplado al resto de espectadores porque todos los que aplauden escuchan el ruido de todos los aplausos. Como en el caso de las células cardíacas, aquí tenemos cientos de osciladores, el público, sin un líder que los organice, y la sincronización emerge de forma espontánea.

Imagine que se encuentra en una sala de conciertos y su música favorita acaba de tocar la última canción. Seguro que aplaudiría con entusiasmo. Hágalo e intente determinar la frecuencia de sus palmadas. Suponga ahora que lleva un rato aplaudiendo. Todos quieren un bis. Y el público comienza a sincronizar sus aplausos. Pruebe ahora a aplaudir figurándose esas condiciones. ¿Es la frecuencia muy diferente?

Para estudiar el mecanismo y el desarrollo en el tiempo de la sincronización de aplausos, el grupo



Un diseñador de moda recibe el aplauso de las modelos y el público tras un desfile. REUTERS

de físicos integrado por Z. Néda, E. Ravasz, Y. Brechet, T. Bishkek y A.-L. Barabási, realizó grabaciones de ovaciones en conciertos y óperas en Hungría y Rumanía. Los registros indican que, al comienzo de la ovación, la mayoría de los aplausos son entusiastas, las frecuencias de las palmadas son muy altas y la sincronización no es posible. En su experimento mental del aplauso entusiasta, aproximadamente habrá dado unas cuatro palmadas por segundo. En las grabaciones, pasados unos pocos segundos los espectadores redujeron a la mitad su frecuencia de aplauso y entonces se hacía posible un período de sincronización. Seguro que más o menos, en su experimento mental, su aplauso sincronizado habrá sido de alrededor de dos palmadas por segundo, la mitad que en el caso entusiasta. De hecho, estudiando este fenómeno

tan pueril los físicos habían descubierto una nueva ruta hacia la sincronización (por doblamiento de periodo o división a la mitad de la frecuencia) no observada anteriormente.

Curiosamente, en las grabaciones, el proceso de sincronización y desincronización se repetía varias veces. Los científicos llegaron a la conclusión de que se trataba del resultado de un curioso compromiso: el público intenta sincronizar sus aplausos para aunar intensidades y llamar la atención del artista, sin embargo, eso es sólo posible si la frecuencia de palmadas es baja, cosa que hace que el ruido de la sala realmente disminuya. Algunos espectadores, al percatarse de ello, vuelven a redoblar sus aplausos y eso aumenta el ruido, pero entonces la sincronización se deshace. Y, así, el proceso vuelve a repetirse una y otra vez.