Dinámica de osciladores acoplados por radiación

H. Rivera-Ramirez, A. Parravano y M. G. Cosenza Universidad de Los Andes, Centro de Física Fundamental, Área de Caos y Sistemas Complejos, Apartado Postal 26, La Hechicera, Mérida 5251, Venezuela

Recibido el 15 de enero de 2004; aceptado el 19 de junio de 2004

Se diseñó y construyó un sistema electrónico de osciladores luminosos para estudiar experimentalmente el surgimiento de auto-organización cuando la radiación actúa como mecanismo de acoplamiento entre los osciladores. El montaje experimental consiste en un conjunto de LEDs (diodos emisores de luz) pulsados y fotorresistencias. La distancia entre los elementos osciladores puede variarse para modificar el grado de acoplamiento entre ellos. El sistema es heterogéneo debido a las diferencias existentes entre los distintos componentes electrónicos de cada oscilador. Se observó la ocurrencia de fenómenos de sincronización y formación de patrones espacio-temporales en este sistema.

Descriptores: Osciladores dinámicos; sistemas acoplados; auto-organización; sincronización.

A system of electronic oscillators was designed to study experimentally the emergence of self-organization when the radiation acts as the mechanism of interacction between the oscillators. The experimental array consists of a set of pulsed LEDs (Light Emision Diodes) and photoresistors. The distance between the oscillating elements can be varied in order to modify the degree of coupling among them. The system is not completely homogeneous due to existing differences among the different electronic components of each oscillator. The occurrence of out of phase synchronization and the formation of spatiotemporal patterns are observed in this system.

Keywords: Dynamical oscillators; coupled systems; self-organization; syncronization.

PACS: 05.45.Xt

1. Introducción

Aunque han sido observados en la naturaleza fenómenos de auto-organización colectiva en sistemas de elementos dinámicos acoplados [1-6], así como también en situaciones artificiales (redes neuronales, láseres multimodo, uniones Josephson, etc.), han sido hasta ahora pocos los experimentos controlados realizados para estudiar estos fenómenos y corroborar los modelos teóricos. Recientemente, varios experimentos han sido efectuados con celdas electroquímicas acopladas [7-9] y con osciladores de agua salada acoplados globalmente [10].

En este artículo se presenta un arreglo experimental de osciladores luminosos electrónicos acoplados, en el cual el agente mediador de las interacciones es la radiación. Este sistema está inspirado en un modelo astrofísico de formación autorregulada de estrellas a gran escala introducido por Parravano [11]. En esos procesos la interacción entre las estrellas es debida principalmente a la radiación emitida por ellas.

El arreglo experimental aquí utilizado consta de varios osciladores electrónicos, cada uno de los cuales contiene tres elementos básicos: un emisor (LED), un receptor (fotorresistencia) y un comparador con histéresis que apaga el (LED) cuando el nivel de radiación \mathcal{F} en la fotorresistencia satisface $\mathcal{F} > \mathcal{F}_{up}$, y lo enciende si $\mathcal{F} < \mathcal{F}_{down}$, donde \mathcal{F}_{up} y \mathcal{F}_{down} corresponden ha determinados umbrales y $\mathcal{F}_{up} > \mathcal{F}_{down}$. En ausencia de fuentes luminosas externas, la única fuente de radiación es el LED del elemento. Debido al retraso en la respuesta de la fotorresistencia ante cambios de \mathcal{F} , los intervalos de tiempo que el LED permanece encendido y apagado son diferentes. Si el LED está suficientemente cerca de la fotoresistencia, el elemento oscilará, ya que cuando el LED está en-

cendido $\mathcal{F} > \mathcal{F}_{up}$, y entonces el comparador apagará el LED haciendo que $\mathcal{F} < \mathcal{F}_{down}$.

Cuando un conjunto de estos osciladores se encuentran próximos unos de otros, la radiación emitida por cualquiera de los osciladores afecta el valor resistivo de la fotorresistencia de los otros osciladores. Así, el conjunto de osciladores está acoplado por la radiación que éstos emiten, de manera que en un momento dado, la fotorresistencia de un oscilador es iluminada por los LEDs de los osciladores encendidos, entre los cuales puede o no estar su propio LED. Aunque el sistema es muy simple, éste contiene los ingredientes mínimos necesarios para el surgimiento de diversos comportamientos colectivos no triviales.

2. Experimento y resultados

Se dispuso un conjunto de cuatro osciladores acoplados radiativamente según el esquema explicado anteriormente. Los LEDs se colocaron simétricamente en los vértices de un cuadrado sobre un plano, y las fotorresistencias se ubicaron en los vértices de otro cuadrado sobre un plano paralelo al anterior. Los pares LED-fotorresistencia de cada oscilador están dispuestos uno frente al otro en los planos paralelos.

Se estudió el comportamiento de los osciladores en función de la distancia D entre los planos. Al variar D, tanto la frecuencia de oscilación como el acoplamiento radiativo entre los osciladores cambian. Para cada distancia D se ajustaron los umbrales \mathcal{F}_{up} y \mathcal{F}_{down} de cada oscilador con el fin de mantener su frecuencia aproximadamente constante. De esta manera se pudo hacer un estudio de la dinámica del sistema en función de su grado de acoplamiento radiativo. El coeficiente de acoplamiento es definido aquí como el cociente entre el flujo de radiación proveniente del LED de un oscilador vecino (\mathcal{F}_{vecino}) y el flujo de radiación del LED propio del oscilador (\mathcal{F}_{propio}), esto es,

$$\epsilon = \frac{\mathcal{F}_{vecino}}{\mathcal{F}_{propio}} = \left[1 + \left(\frac{D_0}{D}\right)^2\right]^{-3/2},\qquad(1)$$

donde D_0 es la distancia entre el LED propio del oscilador y el LED del vecino.

Cada vez que se varía la distancia entre los planos, se presenta al principio un estado transitorio, que tiende a estabilizarse transcurridas pocas oscilaciones. En el caso de acoplamientos fuertes, el sistema tiende a estabilizarse en una configuración fija, mientras que para acoplamientos débiles el estado transiente desordenado persiste por mayor tiempo, y la configuración asintótica es multiestable; es decir, que diferentes realizaciones de las condiciones iniciales del experimento pueden conducir a diferentes secuencias de encendidoapagado del arreglo de osciladores.

La Fig. 1 muestra los patrones espacio-temporales típicos observados. Las barras negras representan el estado encendido del emisor de cada oscilador. El tiempo que un oscilador se mantiene encendido lo denominamos T_{enc} , y el tiempo que permanece apagado, T_{apag} . Los mapas de retorno en la Fig. 2 dan la relación entre períodos consecutivos durante la evolución de un oscilador. Esto es, $\Delta(t+1) = (T_{enc} + T_{apag})_{t+1}$ vs $\Delta(t) = (T_{enc} + T_{apag})_t$, donde $(T_{enc} + T_{apag})_{t+1}$ es el intervalo de tiempo entre encendidos sucesivos del oscilador. El período de oscilación $T_0 = T_{enc} + T_{apag}$ de cada oscilador desacoplado se calibró lo más cerca posible al valor 285 ms.



FIGURA 1. Patrón espacio temporal para cuatro elementos. a) $\varepsilon \simeq 0.04$, D = 1.00, b) $\varepsilon \simeq 0.21$, D = 2.00, c) $\varepsilon \simeq 0.31$, D = 2.50. d) $\varepsilon \simeq 0.41$, D = 3.00, e) $\varepsilon \simeq 0.50$, D = 3.50. f) $\varepsilon \simeq 0.57$, D = 4.00 g) $\varepsilon \simeq 0.63$, D = 4.50.



FIGURA 2. Mapa de retorno para cuatro elementos con parámetros de acoplamiento débil e intermedio. a) $\varepsilon \simeq 0.04$, D = 1.00, b) $\varepsilon \simeq 0.5$, D = 3.50.

El eje x de los patrones espaciotemporales en la Fig. 1 representa el tiempo, y el eje y corresponde a los estados de los cuatro osciladores. Los paneles 1.(a-g) muestran los patrones espaciotemporales con acoplamientos que van desde $\epsilon = 0.04$ (D = 1.1 cm) hasta $\epsilon = 0.63$ (D = 4.5 cm). En el patrón 1.a se puede observar la formación de dominios (clusters) periódicos, mientras que en los paneles 1(c) y 1(d) no existe un patrón bien definido; más bien se observa un estado intermitente entre sincronización y formación de dominios.

En el caso de acoplamientos débiles (Figs. 1a y 1b) se observan dos comportamiento bien diferenciados. Para $\varepsilon = 0.04$ el comportamiento de Δ_t es aperiódico para dos de los osciladores, mientras que para $\varepsilon = 0.21$ los cuatro osciladores tienen un comportamiento periódico con aproximadamente el mismo período.

La Fig. 2a muestra el mapa de retorno de los cuatro osciladores para $\varepsilon = 0.04$.

A medida que el acoplamiento aumenta, se observa que el sistema se va haciendo progresivamente más periódico. En el caso de acoplamiento fuerte, Figs. 1f y 1g, la mayor parte del tiempo los cuatro osciladores se mantienen fuera de fase y con un período muy similar, aunque muy ocasionalmente algunos de los osciladores pueden duplicar su período durante un solo ciclo.

La Fig. 2b muestra el mapa de retorno para el caso $\varepsilon = 0.5$. Nótese que la casi totalidad de puntos en el mapa de retorno está localizada en una región muy pequeña del plano $[\Delta(t+1), \Delta(t)]$, lo que indica la presencia de un punto fijo. El sistema se ha organizado de tal manera que en todo momento hay un oscilador encendido y la frecuencia de oscilación aumenta en aproximadamente 15 % con respecto a la frecuencia del oscilador aislado.

3. Conclusiones

En este trabajo se diseñó un arreglo experimental de osciladores electrónicos acoplados por radiación, entre los cuales el agente mediador de la interacción es la radiación. Hasta donde conocemos, no se han efectuado otros experimentos para estudiar el surgimiento de auto-organización en sistemas simples acoplados por radiación.

- A. Parravano y M.G. Cosenza, Int. J. of Bifurcation and Chaos 9 (1999) 2311.
- K. Kaneko y I. Tsuda, "Complex systems: Chaos and Beyond" (Springer 2000).
- A. Pikovsky, M. Rosemblun y J. Kurtz, "Sinchronization: a universal concept in nonlinear sciences", (Cambridge U Press, 2002).
- M.G. Rosemblun, A.Pikovsky y J. Kurtz, *Phys. Rev. Lett.* 76 (1996) 1804.
- 5. I. Waller y R. Kapral, Phys. Rev. A 30 (1984) 2047.

El modelo experimental muestra comportamientos semejantes a los observados en el proceso de formación estelar a gran escala. En particular, se observa que cuando el acoplamiento radiativo es suficientemente grande como para afectar la dinámica de los osciladores, el sistema experimental es capaz de auto-organizarse para minimizar el número de elementos que se encuentran activos en un momento dado. Este comportamiento es el resultado de una retroalimentación negativa que forza a los elementos del sistema a evolucionar fuera de fase. Es interesante notar que la dinámica de los osciladores es modificada por las interacciones, de tal manera de alcanzar una configuración fuera de fase en la cual hay un oscilador encendido en todo momento. Para lograr este estado, los períodos de oscilación de los elementos aumentan para alcanzar esta configuración.

Agradecimientos

Este trabajo fue apoyado por el Consejo de Estudios de Postgrado y por el Consejo de Desarrollo Científico, Humanístico y Tecnológico, ambos de la Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela.

- 6. K. Kaneko, Physica D 41 (1990) 137.
- Z. Fei, B.J. Green y J.L. Hudson, J. Phys. Chem. B 103 (1999) 2178.
- 8. W. Wang, I.Z. Kiss, y J.L. Hudson, CHAOS 10 (2000) 248.
- Z. Fei, R.G. Kelly, y J.L. Hudson, J. Phys. Chem. B 100 (1996) 18986.
- 10. K. Miyakawa y K. Yamada, Physica D 151 (2001) 217.
- 11. A. Parravano, Astron. & Astrophys. 205 (1988) 71.