

## FÍSICA DE SISTEMAS COMPLEJOS

| MÓDULO  | MATERIA                      | CURSO | SEMESTRE  | CRÉDITOS | TIPO     |
|---|------------------------------|-------|---|----------|----------|
| Física de Sistemas Complejos  | Física de Sistemas Complejos | 4º    | 2º  | 6        | Optativa |
| <b>PROFESOR(ES)e</b>  |                              |       | <b>DIRECCIÓN COMPLETA DE CONTACTO PARA TUTORÍAS (Dirección postal, teléfono, correo electrónico, etc.)</b>                        |          |          |
| Dr. Joaquín Marro Borau, en el Departamento de Electromagnetismo y Física de la Materia<br>Correo electrónico: <a href="mailto:jmarro@ugr.es">jmarro@ugr.es</a> .<br>Web personal: <a href="https://ergodic.ugr.es/jmarro/">https://ergodic.ugr.es/jmarro/</a> .<br>Para más información, visitar al profesor (a cualquier hora, aunque es conveniente concertar cita previa en persona o por correo electrónico) en su despacho junto al péndulo Foucault. |                              |       | Dpto. de Electromagnetismo y Física de la Materia, Facultad de Ciencias (véase la casilla a la izquierda)                         |          |          |
|   |                              |       | <b>HORARIO DE TUTORÍAS</b>  |          |          |
|   |                              |       | (véase la casilla a la izquierda y la web del Departamento: <a href="http://ergodic.ugr.es/efm/">http://ergodic.ugr.es/efm/</a> ) |          |          |
| <b>GRADO EN EL QUE SE IMPARTE</b>   |                              |       | <b>OTROS GRADOS A LOS QUE SE PODRÍA OFERTAR</b>   |          |          |
| Física  |                              |       | Matemáticas   |          |          |
| <b>PRERREQUISITOS Y/O RECOMENDACIONES (si procede)</b>  |                              |       |   |          |          |
| Estar terminando el grado, a ser posible habiendo cursado "Termodinámica" y "Física Estadística"; es conveniente haber cursado "Física Computacional", que es optativa en 3º, pero puede también cursarse a la vez.   |                              |       |   |          |          |
| <b>BREVE DESCRIPCIÓN DE CONTENIDOS (SEGÚN MEMORIA DE VERIFICACIÓN DEL GRADO)</b>  |                              |       |   |          |          |
| Complejidad. Irreversibilidad. No linealidad. Automatas y sistemas reticulares con interacciones. Puntos críticos. Homogeneidad. Caos. Universalidad. Ruidos. Difusión. Ecuación de Langevin. Leyes potenciales. Redes complejas. Geometría fractal. Invariancia de escala. Aplicaciones recientes en física y sus extensiones a biología, neurociencia, sociología, economía, etc.   |                              |       |   |          |          |
| <b>COMPETENCIAS GENERALES Y ESPECÍFICAS</b>   |                              |       |   |          |          |

**Transversales:** las usuales, CT1 a CT10, con énfasis en CT4 (Conocimientos de informática), CT8 (Razonamiento crítico) y CT10 (Creatividad).

**Específicas:** las usuales, con énfasis en CE5 (Modelar fenómenos complejos, trasladando problemas al lenguaje matemático)

### **OBJETIVOS (EXPRESADOS COMO RESULTADOS ESPERABLES DE LA ENSEÑANZA)**

El alumno, llegado a este cuatrimestre, ya conoce las descripciones microscópica y macroscópica de la física —como son proporcionadas, respectivamente, por las mecánicas clásica y cuántica y por la termodinámica y la hidrodinámica, por ejemplo— y ha contactado con la física estadística, que relaciona con rigor esas descripciones en el caso de sistemas en equilibrio termodinámico.

Pero ésta es una circunstancia especial que no suele darse en los casos que más interesan ahora, como cuando se establece turbulencia en un fluido, o unos compuestos químicos logran el primer indicio de vida independiente, o el sistema nervioso consigue funciones del más alto nivel, por ejemplo. Es entonces relevante el concepto de sistema complejo, capaz de mostrar una fascinante fenomenología debida a cooperación entre elementos. El estudio reciente en física de estos sistemas complejos ha llevado al desarrollo de potentes métodos de análisis que descansan en computación y ha generado o renovado conceptos, todo ello trascendiendo las fronteras de la física hasta invadir los fundamentos de otras ciencias, incluyendo biología y sociología.

Es ésta la situación que se propone describir la asignatura, a la vez que pretende ayudar al alumno a

- 1) desarrollar sus habilidades para analizar y plasmar mediante algoritmos lo esencial en sistemas y procesos naturales, aprendiendo así a resolver con eficacia y precisión problemas diversos,
- 2) usar ordenadores de modo creativo en la modelización de situaciones de interés en ciencia, tecnología y gestión, y
- 3) aceptar, si desea hacerlo, los desafíos que, una vez graduado, le puede plantear la investigación actual en centros públicos o privados.

### **TEMARIO DETALLADO DE LA ASIGNATURA**

1. Introducción. Complejidad. Falta de linealidad. Autómatas celulares. El juego de la vida. Sistemas reticulares. Hidrodinámica. Sociología cuantitativa. Dilemas. Modelo del votante y procesos de invasión. Universalidad.

2. Estado estacionario fuera del equilibrio. Cambios de fase. Criticalidad. Invariancia de escala. Homogeneidad. Correlaciones. Leyes potenciales. Auto-organización. Pilas de arena. Percolación. Parámetro de orden. Auto-similitud. Terremotos. Física del tráfico. Gases reticulares. Contacto. Percolación dirigida. Reacción-difusión.

3. Caos. Modelo de May. Sistemas dinámicos. Integrabilidad y ergodicidad. Heino-Heiles. Poincaré. Lorenz. Coeficientes de Liapunov. Atractores extraños. Ruido versus caos. Utilidad del caos. Órbitas, puntos fijos y estabilidad en mapas unidimensionales. Bifurcaciones. Telarañas. Universalidad. Analogía con cambios de fase. Renormalización.

4. Geometría fractal. Regularidad, aleatoriedad y auto- semejanza. Dimensiones. Fractal. Ejemplos.



Leyes potenciales, homogeneidad e invariancia de escala. Cálculo de la dimensión Hausdorff. Relevancia. Multifractalidad. Rugosidad. Caminos aleatorios y renormalización.

5. Otros conceptos. Solitones. Cuasi-partícula. Difusión no lineal. Sistemas magnéticos: fronteras entre dominios. Formación de patrones. Agregación y crecimiento difusivo. Electrodeposición. Caminos aleatorios sesgados. Dedos viscosos. Ecuación de Ginzburg-Landau.

## **BIBLIOGRAFÍA**

Básica: El curso sigue estrechamente el esquema de los libros:

- J. Marro, "Física y vida" (Editorial Crítica, Barcelona 2008), y
- J. Marro, "Physics, Nature and Society — A Guide to Order and Complexity in our World" (Springer 2013, in press),

pero el curso es más completo que estos libros, pues proporciona estructura matemática adicional y extiende los temas más importantes. La estructura matemática de interés está, ampliada, en

- J. Marro and R. Dickman, "Nonequilibrium Phase Transitions in Lattice Systems" (Cambridge University Press, Cambridge 2005),

y el curso amplía algunos temas tal como se hace, por ejemplo, en los libros:

- P.S. Addison, "Fractals and Chaos" (IOP Pub., Bristol 1997),
- H. Haken, "Synergetics, an Introduction: Nonequilibrium Phase Transitions and Self-Organization in Physics, Chemistry, and Biology" (Springer-Verlag, New York 1983),
- L. Lam, "Nonlinear Physics for Beginners" (World Scientific 1998).

Adicional: También se recomienda la lectura de los libros:

- R. Axelrod, "The Evolution of Co-operation" (Penguin Books 1984)
- P. Bak, "How Nature Works: The Science of Self-Organized Criticality" (Springer-Verlag 1996)
- R.J. Creswick et al., "Introduction to Renormalization Group Methods in Physics" (Wiley, NY 1992)
- H. J. Jensen, "Self-Organized Criticality: Complex Behavior in Physical and Biological Systems" (Cambridge Univ. Press 1998)
- K. Sigmund, "Games of Life" (Penguin 1995)

## **ENLACES RECOMENDADOS**

Información complementaria, incluyendo abundante bibliografía comentada así como trabajos y simulaciones interactivas, puede verse en el sitio web específico: <http://ergodic.ugr.es/imarro/fisico/>

## **METODOLOGÍA DOCENTE**

**Clases de teoría**: Sesiones para todo el grupo de alumnos en las que el profesor explicará los contenidos teóricos fundamentales y su importancia en el contexto de la materia.

**Prácticas:** Sesiones para todo el grupo de alumnos en las que éstos trabajarán individualmente en los proyectos relacionados bajo la supervisión del profesor. Los alumnos resolverán de manera autónoma problemas de entre los propuestos durante las clases sobre los contenidos teóricos. Eventualmente, estos problemas serán resueltos en clase por el profesor o los propios alumnos.

**Proyectos:** Cada alumno deberá abordar de forma individual los proyectos propuestos en sincronía con el temario, para lo cual deberá aplicar los conceptos y técnicas expuestos en las clases de manera creativa.

### PROGRAMA DE ACTIVIDADES

| Primer cuatrimestre | Temas del temario | Actividades presenciales<br>(NOTA: Modificar según la metodología docente propuesta para la asignatura) |                            |                                   |                             |                  |      | Actividades no presenciales<br>(NOTA: Modificar según la metodología docente propuesta para la asignatura) |   |                          |      |
|---------------------|-------------------|---|----------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|------------------|------|--|---|--------------------------|------|
|                     |                   | Sesiones teóricas (horas)   | Sesiones prácticas (horas) | Exposiciones y seminarios (horas) | Tutorías colectivas (horas) | Exámenes (horas) | Etc. | Tutorías individuales (horas)  | Estudio y trabajo individual del alumno (horas) | Trabajo en grupo (horas) | Etc. |
| Semana 1, 2 y 3     | 1                 | 6   | 6                          |                                   |                             |                  |      |  |   |                          |      |
| Semana 4, 5 y 6     | 2                 | 6   | 6                          |                                   |                             |                  |      |  |   |                          |      |
| Semana 7, 8 y 9     | 3                 | 6   | 6                          |                                   |                             |                  |      |  |   |                          |      |
| Semana 10, 11 y 12  | 4                 | 6   | 6                          |                                   |                             |                  |      |  |   |                          |      |
| Semana 13, 14 y 15  | 5                 | 6   | 6                          |                                   |                             |                  |      |  |   |                          |      |
| Total horas         |                   | 30  | 30                         |                                   |                             |                  |      |  |   |                          |      |

### EVALUACIÓN (INSTRUMENTOS DE EVALUACIÓN, CRITERIOS DE EVALUACIÓN Y PORCENTAJE SOBRE LA CALIFICACIÓN FINAL, ETC.)

El alumno ha de acreditar conocimiento uniforme de toda la materia, como se adquiere participando activamente en clase, de modo que la asistencia continuada es parte esencial de la evaluación (lo que influirá hasta en un 50% de la nota final), y ha de profundizar en uno de los temas característicos de la signatura, lo que puede conseguir haciendo un trabajo personal tutelado (lo que determinará el resto de la nota final). Hay evaluación a lo largo del curso y, al finalizar éste, mediante las exposiciones orales y/o escritas que se determinen entre alumnos y profesor. El trabajo personal tutelado puede cambiarse, de acuerdo con el profesor, por un examen final que se valorará del mismo modo. Es necesario presentar a principio de curso una ficha completa con la información que se determine.



## INFORMACIÓN ADICIONAL

Las leyes fundamentales de la física, tales como las ecuaciones de Newton, Schrödinger y Maxwell, sorprenden por que, a pesar de su sencillez, tienen un amplísimo rango de validez. Sin embargo, los sistemas físicos con muchos elementos manifiestan comportamientos difíciles de comprender, esto es, tienen origen, forma y propiedades que no se infieren con sencillez de esas leyes básicas, que son una característica propia de sus constituyentes.

Con objeto de profundizar en esta observación, se ha introducido en ciencia el concepto de sistema complejo, esto es, uno que no es fácil de describir globalmente aunque conocemos relativamente bien su constitución y las propiedades individuales de sus componentes elementales. Desde esta perspectiva, el mundo es una colección de sistemas complejos. Una de sus propiedades es la habilidad que tienen para evolucionar según muy distintos caminos, lo que dificulta algunas predicciones. Otra propiedad notable es su tendencia a crear orden y formar estructuras, lo que genera un universo caracterizado por un alto grado de estructuración a muchos niveles.

Hoy disponemos de modelos básicos —ecuaciones diferenciales o conjuntos de unidades que cooperan de modo rudimentario— que capturan esas complicadas conductas capaces de generar a la vez orden e incertidumbre. El estudio de estos modelos, motivado por problemas en la frontera entre la física y otras disciplinas —incluyendo biología y medicina, ciencia de materiales, economía, química e informática, y matemáticas y sociología— es objeto de la "física de sistemas complejos" que, de este modo, ha diseñado un camino eficaz para llegar a comprender la hidrodinámica, los mercados financieros, la ecología de las especies interdependientes, los procesos cooperativos en medios moleculares,... y la fenomenología emergente en organismos vivos, que es un caso límite de complejidad. Al profundizar en estas situaciones aparecen conceptos tales como auto-semejanza e invariancia de escala, atractores, universalidad, cambios de fase y criticalidad fuera del equilibrio, homogeneidad, auto-organización, avalanchas y catástrofes, por ejemplo.

Esta asignatura, de naturaleza esencialmente práctica, tiene una estructura informal muy interactiva. Se apoya en un libro y en un sitio web específicos, y es una completa introducción a esos fenómenos y conceptos mencionados y a las técnicas recientemente desarrolladas para su estudio.

El Departamento de Electromagnetismo y Física de la Materia aprobó en sesión de consejo de Departamento de fecha 23/05/2014 la presente guía docente. Para que conste a los efectos oportunos,

Fecha, firma y sello

Fdo.: Director/a o Secretario/a

