

ADRIÁN GARCÍA

@ELFISICOBARBUDO



CAOS, ORDEN

Y OTRAS MOVIDAS DEL UNIVERSO

LA FÍSICA QUE NO CONOCÍAS



OBERON

ADRIÁN GARCÍA

@ELFISICOBARBUDO

**CAOS,
ORDEN**
Y OTRAS MOVIDAS DEL
UNIVERSO

LA FÍSICA QUE NO CONOCÍAS

OBERON

Responsable editorial:
Susana Krahe Pérez-Rubín

Diseño de cubierta:
Patricia Bataller

Reservados todos los derechos. El contenido de esta obra está protegido por la Ley, que establece penas de prisión y/o multas, además de las correspondientes indemnizaciones por daños y perjuicios, para quienes reprodujeren, plagiaran, distribuyeren o comunicaren públicamente, en todo o en parte, una obra literaria, artística o científica, o su transformación, interpretación o ejecución artística en cualquier tipo de soporte o comunicada a través de cualquier medio, sin la preceptiva autorización.

© Copyright de los textos:
Adrián García (@elfisicobarbudo)

© Copyright de las ilustraciones de interiores:
Adrián García (@elfisicobarbudo)



© EDICIONES OBERON (G. A.), 2023
Valentín Beato, 21. 28037 Madrid
Depósito legal: M. 16.306-2023
ISBN: 978-84-415-4842-8
Impreso en España

A mis tres pilares:

*A Mamá, Papá y Sister,
por haberme dado todo lo que me ha hecho ser
quien soy.*

*A Irene,
por tu apoyo incondicional y dejarme compartir mi
vida contigo.*

*A Olivia
para que encuentres muchos «hombros de
gigantes»
sobre los que levartarte.*

ÍNDICE

PRÓLOGO	10
1. LA OTRA FÍSICA	17
Pastilla roja, pastilla azul	18
El botánico y las partículas bailarinas	24
Empieza la fiesta de los gases	28
La fiesta de los Brown-ies	32
Los imanes de tu nevera	38
Guetos	44
<i>Be water, my friend</i>	49
2. SISTEMAS COMPLEJOS	53
¡A metamorfosearse!	54
Complejo, pero no complicado	57
Uno más uno puede ser siete	59
Más es diferente	63
Necesitamos una base de operaciones	67
El siglo de la complejidad	69
El vuelo de los estorninos	74
Lineal o no lineal, esa es la cuestión	79
3. FENÓMENOS EMERGENTES	85
Los atascos: el gran reto de la humanidad	86
Atascos en la tercera fase	90
¡Nadie al volante!	96
Cada uno hace su parte y todos contentos	100
El ciclo sin fin que lo envuelve todo	103

4. REDES	111
Dar cera, pulir cera	112
De puente a puente y tiro porque me lleva	
la corriente	119
Ahora estás pensando en redes	122
Fácil entrar, pero imposible salir	126
Grado arriba, grado abajo	130
El camino más corto y el número de Dios	135
De turismo por el mundo	140
Redes y sagas literarias	144
5. TIPOS DE REDES	147
Carpetas voladoras en un mundo pequeño	148
Redes reales para un mundo real	156
Un mundo pequeño	160
Enlaces débiles para una transmisión fuerte	164
Bacon, Kevin Bacon	166
La fama llama a la fama	169
Nos están atacando	175
6. LEYES DE POTENCIA	181
Filtraciones en el mundo <i>gamer</i>	182
¡Hacia la luna!	185
Por lo menos tenemos salud	187
La pared de Pareto	189
1234	190
Una montaña de un grano de arena	196
El eco de la campana	204
7. FRACTALES	207
Verduras, Salvador Dalí y Superman	208
Hazme un copito de nieve	212
Es peligroso ir solo, toma esto	216

¿Cuánto mide la costa de Gran Bretaña?	219
Las nubes no son esferas	224
Pero... ¿cómo?	229
Hay un fractal en mi bota	236
8. PATRONES	241
Círculos de hadas	242
El estampado de cebra vuelve a estar de moda	251
Allá donde nacen los patrones	260
Más allá de Turing: sopa de miso,	
Elsa y El Señor de los Anillos	266
9. SINCRONIZACIÓN	275
El despertar del aplauso	276
Una extraña simpatía	282
La fiesta de las luciérnagas	286
No es mi <i>tempo</i>	290
Siente la sincronización en tu cuerpo	297
Linces, liebres y violinistas	300
10. CAOS	307
Algo no funciona bien	308
Derrotando al demonio	311
El efecto gaviota	317
Las alas de la mariposa	323
Caótico, pero no mucho	330
¿Está el caos? Que se ponga	332
11. EPÍLOGO	339
12. OTRAS LECTURAS RECOMENDADAS	345

PRÓLOGO

—Y bueno, ¿tú a qué te dedicas? —me pregunta con entusiasmo.

—Pues mira, yo estudié física y —respondo lentamente, alargando las palabras, sabiendo a la perfección el comentario que vendrá después, tras años de haber vivido esta misma interacción.

—Ah, ¡física! A mí se me daban fatal las mates. ¿Y sabes construir bombas? ¿Fabricar drogas? —vuelve a preguntar, aún con más entusiasmo.

—No, no, eso está más relacionado con la química —contesto con una sonrisa— la física es...

—Ya sé. Lo del espacio, ¿verdad? ¡Entonces estudias los agujeros negros, la materia oscura y todo eso!

—No. Bueno, sí, hay físicos que estudian eso, claro. Pero yo me especialicé en otro campo.

—¡Chachi! ¿Y cuál es ese campo? ¿Física cuántica?

—Me temo que no. Verás, es un campo relativamente nuevo, muchos lo conocen con el nombre de física de sistemas complejos —digo mientras visualizo la pregunta que va a venir después y voy preparando la respuesta que llevo entrenando desde hace años.

—No lo había oído nunca —me mira con extrañeza—, ¿y en qué consiste?, ¿de qué va eso de los sistemas complejos?

—Pues veras...

Esta conversación la he tenido infinidad de veces. No me gustaría que me malinterpretas, me encanta y me pone el corazón calentito el interés que muestran la mayoría de personas que conozco cuando se enteran de que he estudiado algo relacionado con ciencia. Ese horrible chascarrillo de que «la ciencia no interesa», cualquiera que haya estudiado una carrera científica sabe que no es verdad. La inmensa mayoría de la gente tiene una curiosidad científica casi infinita, solo superada por las ganas de saber que muestra un niño pequeño en la edad de las preguntas. Es solo que, a veces, se me hace difícil saber ajustar con cuánto detalle puedo meterme a explicar un tema relativamente complejo antes de gastar toda la barra de interés de mi interlocutor. Como soy consciente de que no puedo enrollarme más de la cuenta al contarle a alguien las partes de la física que me apasionan, siempre tengo que elegir qué contar. Y claro, me suelo quedar con la sensación de que me he dejado mucho fuera.

Este libro que tienes en tus manos es mi respuesta completa que continúa la conversación que encabeza este prólogo. Es (casi) todo lo que me gustaría contarle a alguien acerca de lo que me especialicé en física, los sistemas complejos, para que se den cuenta de lo interesantes que pueden ser. Una tarea un poco árida de principio, porque casi nadie sabe qué son esos sistemas complejos. No te preocupes, va a ser de lo primero que te explique. En estas páginas podrás encontrar todos esos estudios, esos logros, esos experimentos, esos protagonistas históricos y, sobre todo, esas preguntas sin respuesta que uno se encuentra cuando se adentra a nivel usuario en el mundo de los sistemas complejos. Espero, de verdad, que lo encuentres tan fascinante como yo lo hago.

Por si esta no es tu primera vez, déjame avisarte de que hay un par de cosas que puede que te llamen la atención y te parezcan diferentes a lo que suele encontrarse típicamente en un libro de divulgación de física. La primera, es que podrás comprobar que la mayoría de ejemplos que te voy a poner en estas líneas tienen poco o nada que ver con lo que uno piensa que hacen los físicos. Van a abundar los animales, las redes sociales, las plantas, el mercado de valores. Una de las características de la ciencia de la complejidad, y la que personalmente me hizo decantarme por este campo, es que se enfoca en desarrollar herramientas matemáticas generales que luego pueden aplicarse allá donde haga falta. Da igual si estamos hablando de personas que comparten aficiones, de animales que se comen mutuamente o de propiedades cuánticas, los físicos de la complejidad meten sus narices allá donde creen que tienen algo que aportar. En el buen sentido de la expresión, claro.

La segunda cosa que te puede llamar la atención de este libro, tanto al leerlo como revisando la bibliografía, es que gran parte de las referencias y estudios comentados son relativamente recientes. Esto es porque, valga la redundancia, «la otra física» es un campo nuevo. Muchas de las teorías que te voy a presentar tienen menos de 100 años de recorrido, así que siguen siendo campos muy

activos en los que se publican estudios revolucionarios cada mes. Porque todavía queda mucho por hacer. Incluso he tenido la oportunidad de coincidir en la misma sala con algunas de las figuras que en estas páginas aparecen. Menos de las que me gustaría, claro, pero no es algo habitual cuando se habla de física, que suele estar desarrollada sobre los cimientos que han construido científicos que llevan siglos muertos.

Así pues, gran parte del objetivo de este libro pasa por descargar y compartir de alguna forma toda esa fascinación que siento por esa rama que yo conozco como «la otra física». Aunque no es el único objetivo. Ni mucho menos. Con la mano en el corazón y muy a mi pesar, creo que a los sistemas complejos les hace falta un poco de marketing a la hora de captar nuevas mentes que contribuyan a su desarrollo. Que aquellos jóvenes que están a punto de decidirse por estudiar física sean conscientes de que, con los conocimientos y herramientas que van a aprender en la facultad, pueden dedicarse a campos tan necesarios como el estudio de epidemias, del movimiento animal, de la estabilidad de la red eléctrica o de la propagación de memes. La física es muchísimo más amplia de lo que muchos piensan a la hora de tomar ese camino profesional. Al menos, es mucho más amplia de lo que yo pensaba que era cuando empecé. También espero que sea revelador para aquellos que ya tienen claro que van a dedicarse a otra cosa, que sepan que la interdisciplinariedad está más «de moda» que nunca, con investigadores e investigadoras especializados en campos muy distantes (en apariencia), pero que colaboran estrechamente para empujar, paso a paso, las fronteras del conocimiento humano.

Escribió Stephen Hawking en el prólogo de su famosísimo *Breve historia del tiempo* (1988) que alguien le comentó que por cada ecuación que incluyera en el libro reduciría las ventas a la mitad, así que acabó incluyendo una sola: la mítica $E = mc^2$. Ese libro de Hawking es muy importante para mí, en el primer capítulo te cuento por qué. Así que, como el niño que se cuelga una tela roja a la espalda para imitar a su superhéroe favorito, he intentado hacer de

este libro un espacio libre de ecuaciones. Mi intención es que cualquiera, independientemente de la mochila de conocimientos matemática que traiga, pueda alucinar con las extrañas aplicaciones que físicos y físicas han encontrado para sus modelos. Espero haberlo conseguido.

Resumiendo un poco la ruta que vamos a seguir, comenzaremos nuestro paseo por «la otra física» justificando el por qué este título, viendo qué es lo que tiene de diferente «esta física» para tener que estar diferenciada de «la física de toda la vida». Luego te presentaré, por fin, a los verdaderos protagonistas de este libro, los sistemas complejos. Veremos qué son, cómo se definen y algunos ejemplos concretos para ir abriendo boca. Pero los sistemas complejos no tienen sentido sin su característica estrella que los hace tan interesantes, los fenómenos emergentes. El elemento fundamental que los hace tan interesantes. El paseo se verá levemente interrumpido por las pegajosas redes y sus tipos, una forma de ordenar los sistemas en función de las interacciones de sus elementos. Al liberarnos de las redes caeremos en el tobogán de las leyes de potencia, una relación matemática que encontramos en más lugares de los que te puedes imaginar. La segunda mitad del libro está dedicada a esos fenómenos que se encuentran en los sistemas complejos y que tanta fascinación despiertan. Hipnóticos fractales, estéticos patrones y rítmica sincronización serán las siguientes paradas, más orientadas a descubrir las maravillas que pueden aparecer fruto de la interacción entre elementos. Acabaremos el paseo con el fenómeno favorito de las mariposas y las bandas *punk*: el caos.

Pero antes de comenzar este pequeño repaso por los *greatest hits* de «la otra física», no puedo dejar pasar la ocasión de agradecer el imprescindible apoyo que he recibido por parte de mis compañeros y compañeras de «Scenio», de mis amigos y de mi familia. También agradecer las discusiones y revisiones de mis colegas en el Instituto de Física Interdisciplinar y Sistemas Complejos (IFISC, UIB-CSIC), especialmente a Damià Gomila en el capítulo de patrones y a Rodrigo Martínez en el resto

del libro. Los fallos o imprecisiones que pueda haber son completamente *mea culpa*, pero los aciertos no hubieran sido posibles sin todos ellos.

Ahora sí, nos calzamos unas deportivas cómodas, bebemos un poco de agua y comenzamos nuestro viaje por «la otra física».

1 LA OTRA FÍSICA

«Bienvenidos, caballeros, a Aperture Science. Astronautas, héroes de guerra, semidioses... estáis aquí porque buscamos lo mejor: vosotros. ¿Quién quiere contribuir a la ciencia?»

Cave Johnson, *Portal 2* (2011)

PASTILLA ROJA, PASTILLA AZUL

¡Corre, piensa en algo de física! ¿Ya? ¡Perfecto!

Ahora necesito que mantengas esa idea, lo primero que se te ha venido a la mente cuando has leído esta palabra de 6 letras: **física**. En este momento desearía que esto de los libros fuera un medio más interactivo para que me pudieras contar qué has pensado. Saber qué imagen se forma en tu mente cuando piensas en qué significa física.

Me temo que no eres el primero al que le pido esto. Habitualmente hay dos respuestas que se repiten muchísimo cuando hago esta dinámica algo tonta en conferencias o charlas presenciales. Las respuestas que más suelo escuchar por parte del público son que lo más representativo de la física son «cosas de física cuántica» o «cosas de astrofísica». La primera, la física cuántica, es toda esa parte de la física que tanto lo peta en películas de ciencia ficción o superhéroes. El mundo cuántico de la película de *Ant-man* (2015), viajes en el tiempo como los de *Regreso al futuro* (1985), multiversos como *Todo en todas partes al mismo tiempo* (2022), superposición de realidades como en *Coherence* (2013)... ese tipo de cosas. También puede ser que la física cuántica te evoque al famoso gato-zombi de Schrödinger que «está» vivo y muerto a la vez dentro de una caja cerrada, o a conceptos rarísimos como coherencia, superposición de estados, efecto túnel, etc.

Si la cuántica o sus extraños efectos no ha sido tu respuesta, quizá tu cabeza ha ido por la parte del espacio, la rama relacionada con observar y entender nuestro universo. Investigar planetas lejanos, estrellas brillantes, púlsares, agujeros negros como los de *Interstellar*

(2014) o viajes espaciales como los de *Star Wars* (1977) o *Star Trek* (1966). Científicos y científicas armados con enormes telescopios, astronautas con trajes de un blanco pristino que destaca sobre el manto negro del espacio profundo, satélites artificiales, transbordadores espaciales, enormes estaciones espaciales...

También hay una tercera opción habitual, aunque la encuentro con muchísima menos frecuencia, y es la física clásica. Esa parte de la física que está dentro del temario que los profesores y profesoras explican incansablemente en el instituto. Planos inclinados, movimiento rectilíneo uniformemente acelerado, peonzas, palancas... El pilar fundamental de la física actual, los hombros de gigantes sobre los que se levanta gran parte del conocimiento actual acerca de cómo funciona el universo. También es la física más cotidiana, con perdón de la siempre olvidada termodinámica. Dejando de lado esta física clásica, créeme cuando te cuento que me topo muy a menudo con personas con mucho interés por aprender sobre física pero que piensan que la física se centra de manera casi exclusiva en uno de estos dos grandes bloques: o lo que se hace en grandes colisionadores de partículas a muchos metros bajo tierra o lo que se hace en los grandes observatorios astronómicos. Por supuesto, nada más lejos de la realidad.

Pero no pasa nada con que esto sea así, faltaría más. Suelo tener este debate con colegas que se dedican a la divulgación científica, ¿la gente (entendiéndose como «el gran público») piensa en cuántica y espacio al hablar de física porque son los dos temas intrínsecamente más interesantes de esta rama de la ciencia o, por el contrario, las personas piensan en cuántica y espacio porque hay muchísima más divulgación de ellas que del resto de temas? No lo sé. Soy el primero que he devorado *Cosmos* de Carl Sagan siendo niño, y ya más entrado en años, la versión de Neil deGrasse Tyson. También me he maravillado con lo anti-intuitivo que es el mundo cuántico y el efecto túnel o el principio de incertidumbre de Heisenberg. Pero, aún con todo esto, no deja de sorprenderme lo muy desconocidos que son otros

campos dentro de la física. En los debates que he tenido al respecto no llegamos a ponernos de acuerdo. Si me preguntas mi opinión personal, es que sí, que es verdad que esos dos temas (el espacio y la cuántica) son *sexís* por naturaleza. Tienen cierto morbo, ¿no crees? Representan lo más pequeño del universo: el mundo cuántico en el que nuestra intuición falla y rompemos los átomos en ladrillos más pequeños, pero también la rama que más abarca de nuestro universo que es... precisamente todo el universo. Son como los vídeos estos de «Las 10 construcciones de la Segunda Guerra Mundial más temibles y colosales» o «El top de animales más venenosos del mundo». Los extremos encienden nuestra curiosidad y nos invitan a soñar. Lo más alejado de nuestra vida cotidiana, lo más desconocido. Ahí es donde hay más fenómenos nuevos y sorprendentes que conocer y que nos pueden maravillar.

Aunque también creo que gran parte de ese interés por la cuántica y el espacio viene motivado porque hay bastante más material divulgativo que tratan esos temas. Al menos en mi percepción personal. Basta buscar en Google «libro divulgación física» o en YouTube «divulgación física» para darse cuenta que esas dos son las temáticas que más se repiten. Y esto está genial, sin duda. Hay muchísimos periodistas, divulgadoras, científicos e investigadoras que hacen un trabajo excelente explicando temas tan complicados de forma que cualquier persona, tenga o no formación en matemáticas, pueda entender.

Aquí viene mi contrapunto. La física, sobre todo a día de hoy, es mucho más que partículas tan pequeñas que no se pueden observar de ninguna manera. Es mucho más que sobrecogerse ante lo diminutos que somos frente a colosales gigantes rojas. Mucho más. Existe toda una física nueva, con apenas unas pocas décadas de vida, que está creciendo y, junto al resto de «físicas» más conocidas, está ayudándonos a entender el universo que nos rodea. Una física que, personalmente, creo que debe ser más conocida por el gran público. No solo porque es interesantísima si no porque, cómo verás, es el futuro y las nuevas generaciones de científicos y científicas tienen que saber que existe.

Este libro que tienes en tus manos es mi historia con ella, una introducción a esta otra física con la que he mantenido un estrecho contacto desde que me gradué. Una física que ni siquiera durante mi formación me llegaron a presentar del todo. Una física que se está empezando a asentar en estos últimos años con la aparición de nuevas herramientas computacionales. Pero, sobre todo, una física que nace de una estrecha colaboración interdisciplinar entre todas las ramas del conocimiento humano.

Una física que he bautizado como «la otra física».

Matrix (1999) es una de mis películas favoritas. De pequeño me encantaban tanto las múltiples escenas de acción que salen como su cuidada estética, esa combinación de negro látex con el verde característico de las pantallas monocromo de la época. Ya de más mayor y con la cabeza un poco más amueblada, me fascinó la idea detrás del mundo que las hermanas Wachowski plasmaron en su película. Para mí un punto crítico de la película era cuando Morfeo, el mentor del protagonista, le ofrece a Neo, el protagonista, una elección. Tiene que escoger entre dos píldoras: una roja y una azul. «Tomas la píldora azul, la historia termina, te despiertas en tu cama y crees lo que quieras creer. Tomas la píldora roja, te quedas en el País de las Maravillas y te enseño lo profunda que es la madriguera del conejo», le dice Morfeo. Neo no duda demasiado y prefiere comenzar a vivir una vida de sufrimiento y lucha contra las máquinas que gobiernan el mundo a seguir tranquilamente en la simulación conocida como *Matrix*. Bien por nosotros porque gracias a esa decisión tenemos la trilogía de películas original, pero no puedo evitar pensar que, si yo me encontrara en esa situación, *Matrix* hubiera tenido tres cuartas partes del metraje con un primer plano de mi cara dudando qué píldora elegir.

Siempre se me ha dado fatal escoger. Pero terriblemente mal. He sido de esos niños que cuando un amable camarero le preguntaba de qué sabor quería el helado entraba en cortocircuito, sin saber qué responder. ¡Los quiero todos!