

Sean Carroll

**LAS IDEAS FUNDAMENTALES  
DEL UNIVERSO  
ESPACIO, TIEMPO  
Y MOVIMIENTO**

Traducción de Jordi Giménez Samanes

arpa

*A Jennifer*



## ÍNDICE

	Introducción	11
UNO	Conservación	19
DOS	Cambio	45
TRES	Dinámica	75
CUATRO	Espacio	115
CINCO	Tiempo	147
SEIS	Espacio-tiempo	175
SIETE	Geometría	215
OCHO	Gravedad	259
NUEVE	Agujeros negros	291
	Apéndices	
	<i>Apéndice A: Funciones, derivadas e integrales</i>	329
	<i>Apéndice B: Conexiones y curvatura</i>	343



## INTRODUCCIÓN

Mi sueño sería vivir en un mundo en el que la mayoría de las personas estuvieran bien informadas y albergaran opiniones apasionadas en torno a la física moderna. En el que, a la salida de un día duro en el trabajo, nos reuniéramos en el pub con unos amigos y nos pusiéramos a discutir sobre cuál es nuestro candidato preferido a materia oscura, o sobre interpretaciones contrapuestas en torno a la mecánica cuántica. Un mundo en el que, mientras los niños corretearan en una fiesta de cumpleaños, un padre dijera: «No entiendo cómo hay personas que piensan que tiene que haber nuevas partículas próximas a la escala electrodébil»; y otro replicara de inmediato: «Entonces ¿cómo quieres abordar el problema de jerarquía?». Al fin y al cabo, la gente tiene una opinión acerca de la economía de oferta o la teoría crítica de la raza. ¿Por qué no acerca de la cosmología inflacionaria y la teoría de supercuerdas?

Este no es en absoluto el mundo en que vivimos. En mayor medida aún que la mayor parte de las demás disciplinas académicas, la física es un terreno cultivado por y para especialistas. Sus profesionales hablan entre sí en una jerga altamente especializada, en la cual prevalecen conceptos matemáticos de

los que la mayoría de la gente jamás ha oído hablar, mucho menos domina. Hay razones lógicas para que esto sea así, pero no tiene por qué serlo obligatoriamente. La situación se debe en gran medida a la forma en que los físicos tienden a compartir su conocimiento con el resto del mundo.

Si es usted una persona no experta interesada en aprender cosas acerca de la física moderna, tiene básicamente dos opciones. Una es no salirse de una explicación de nivel popular, por la que poder aprender algo acerca de los conceptos importantes, pero sin ahondar en los detalles técnicos o matemáticos. Puede leer libros, asistir a conferencias, ver vídeos, escuchar pódcast. Lo bueno es que contamos ciertamente con un boyante ecosistema de tales recursos, por lo que es posible aprender bastante, aunque de un modo poco sistemático. En el fondo, no obstante, uno sabe que así no alcanzará *el fundamento*. Lo que obtendrá serán imágenes y metáforas, burdas traducciones al lenguaje corriente de la esencia matemática subyacente. Puede llegar a recorrer una distancia impresionante por este camino, pero siempre se perderá algo vital.

El otro camino es hacerse estudiante de física: bien yendo literalmente a la universidad, bien reuniendo los libros de texto y los recursos online idóneos. En el proceso, necesitará conseguir buenas competencias matemáticas: en cálculo y ecuaciones diferenciales por encima de todo, pero en aspectos como análisis vectorial, números complejos, álgebra lineal y otros más. El viaje será gratificante, pero frustrantemente lento. En general, se requiere cursar al menos un año de materias introductorias antes de que el estudiante oiga hablar siquiera de relatividad o de mecánica cuántica. Y la mayoría de estudiantes de física pueden obtener una licenciatura —o incluso realizar todos los cursos conducentes al título de doctor— sin aprender nada de física de las partículas, agujeros negros o cosmología. Tales exquisiteces están reservadas en exclusiva a especialistas de ramas más específicas.

La distancia que separa aprender física con un interés de aficionado, confiando en metáforas y oscuras traducciones, de convertirse en un experto acreditado, moviéndose con comodidad entre ecuaciones de complejidad intimidatoria, es amplia, pero no insalvable. Solo porque yo no quiera ser un piloto de carreras profesional, no significa que vayan a prohibirme conducir. Sin duda existe un camino por el que adentrarse en algo de la esencia auténtica de la física moderna —aunque ello comporte contemplar unas pocas ecuaciones— sin tener que afanarse trabajosamente a lo largo de años de estudios académicos programados.

¡Ha venido al lugar adecuado!

*Las ideas fundamentales del universo* se centra en la idea de que es posible aprender física moderna de verdad, ecuaciones incluidas y todo lo demás, aun si usted es más aficionado que profesional y tiene toda la intención de seguir siendo así. Está pensado para personas que no tienen más experiencia en matemáticas que la del álgebra del instituto, pero que están dispuestas a detenerse en una ecuación y pensar acerca de lo que significa. Si está dispuesto a realizar este pequeño esfuerzo de pensamiento, un nuevo mundo se abrirá ante sus ojos.

\*\*\*

Pasa una cosa con las ecuaciones: que no tienen por qué asustarnos tanto. Constituyen simplemente un modo de resumir de forma compacta una relación entre diferentes cantidades. Una cosa es que nos digan, de acuerdo con la teoría de la relatividad general de Einstein: «la masa y la energía causan una curvatura en el espacio-tiempo»; y otra muy distinta es que nos den la ecuación de Einstein:

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} = 8\pi GT_{\mu\nu}$$



La frase en nuestra lengua corriente nos infunde algo así como un sentimiento acerca de lo que trata la relatividad general, pero la ecuación nos dice lo que realmente es, en términos precisos y sin ambigüedad. Podemos leer todas las palabras que queramos, pero hasta que no entendamos esta ecuación, no entenderemos de verdad la teoría de Einstein.

El problema está en que esta ecuación nos resulta totalmente opaca si no sabemos qué significan esos símbolos. Es un galimatías. Para que nuestra mente la capte, necesitamos entender el papel individual que desempeña cada uno de los números y letras, incluidos los subíndices  $\mu$  y  $\nu$ , letras procedentes del alfabeto griego, por si fuera poco. Hay buenas razones por las que un estudiante medio de física tarda años en recorrer tan largo trecho.

Pero usted lo hará leyendo este libro. Cuando llegue al capítulo 8, entenderá lo que significan todos los símbolos de la ecuación de Einstein, cómo encajan unos con otros y qué es lo que nos dicen acerca del espacio-tiempo y la gravedad. Por mucho que la ecuación incluya letras griegas, entenderla es enormemente más fácil que, pongamos, aprender a hablar y escribir griego moderno.

La mayor parte de los libros de divulgación dan por sentado que usted no quiere hacer el esfuerzo de seguir las ecuaciones. Los libros de texto, por otro lado, asumen que usted no solo quiere entender las ecuaciones, sino *resolverlas*. Y resolver estas ecuaciones requiere un trabajo, una práctica y un aprendizaje enormemente mayores que «meramente» entenderlas.

Permítame insistir en esta distinción entre resolver y entender, porque será la clave para el progreso, tan notablemente rápido, que seremos capaces de realizar. La ecuación de Einstein no solo relaciona un conjunto específico de masa y energía con la curvatura de un espacio-tiempo concreto. Se trata de una relación perfectamente general, del tipo: «usted deme cierta distribución de masa y de energía, y yo le diré cómo

se curva el espacio-tiempo debido a ella». Cumplir tal promesa es a lo que nos referimos con «resolver la ecuación».

A veces resolver una ecuación es fácil: si la ecuación es  $x=y^2$ , y nos dicen que  $y=2$ , la solución es  $x=4$ . No es tan difícil. Pero las ecuaciones de física del mundo real son algo más complicadas, e incluyen nociones de cálculo (las matemáticas del cambio continuo) y otros conceptos avanzados. Resolver tales ecuaciones puede convertirse en una ocupación a tiempo completo para los profesionales de la física. Es muy sensato, por tanto, que en su educación ocupe una parte muy amplia aprender a resolver ecuaciones. Cualquier estudiante de física le dirá que la parte más difícil de los años que lleva en la facultad no es seguir las conferencias a las que asiste, sino resolver las tandas de problemas que los profesores no paran de repartir, como si los estudiantes no tuvieran nada más que hacer los fines de semana.

Aquí, en *Las ideas fundamentales del universo*, no vamos a enseñarle cómo resolver las ecuaciones, pero sí que aprenderá a *entender* las ecuaciones, incluso las que se consideran relativamente avanzadas para el nivel de los manuales de física. Porque resulta que es enormemente más fácil. Tales libros se sustentan en la creencia de que las ideas de los físicos modernos —las de verdad, no las versiones metafóricas rebajadas— pueden ser accesibles a quienquiera que esté dispuesto a realizar un poco de esfuerzo para pensar acerca de las ecuaciones y lo que significan.

\*\*\*

Muy bien, pero ¿cuáles son esas ideas de las que estamos hablando? Hay muchas, como puede imaginar. Las suficientes como para que hayamos repartido el material en una serie en tres partes: *Espacio, tiempo y movimiento*; *Cuantos y campos*; y *Complejidad y emergencia*. Este formato a modo de trilogía

se ha demostrado exitoso para *El señor de los anillos* y otras series populares.

El libro que sostiene en sus manos, *Espacio, tiempo y movimiento*, está centrado en el marco conceptual de la física clásica abanderada por Isaac Newton, que fue el dominante hasta la revolución cuántica del siglo xx. Pero no tema, no vamos a gastar mucho tiempo hablando de poleas y planos inclinados, por importantes que sean. El ámbito de la física clásica incluye profundas cuestiones acerca de la naturaleza del espacio, el tiempo y el cambio, por lo que no tendrá que asustarnos salpicar de algunas consideraciones filosóficas nuestras ecuaciones. Incluye asimismo la teoría de la relatividad, hasta alcanzar las ideas de Einstein acerca del espacio-tiempo curvo, junto con consecuencias tales como los agujeros negros. De modo que este libro con ideas que tienen siglos de antigüedad, pero que nos conducirán hasta conceptos de los que se ocupa la investigación moderna.

En *Cuantos y campos* trataremos de ideas cuánticas tan excitantes como el entrelazamiento y el gato de Schrödinger, pero sobre todo tendremos oportunidad de aprender cosas acerca de la teoría cuántica de campos y la física de partículas, el mejor planteamiento moderno sobre las leyes fundamentales de la naturaleza. En el episodio final, *Complejidad y emergencia*, es donde admitimos que el mundo no está hecho tan solo de dos o tres partículas. Suceden cosas interesantes cuando los sistemas consisten en un gran número de partes en movimiento.

Son muchos conceptos, pero casi todos ellos entran en el reino de la física y ámbitos afines. No se trata de desdeñar las ideas, igualmente grandes e importantes, de otros ámbitos de la ciencia (o del arte y las humanidades, dicho sea de paso), pero en algún lugar tenemos que trazar la línea.

Otra línea que hemos tenido que trazar separa las «ideas sobre las que tenemos buenas razones para creer que son ciertas» de las «especulaciones prometedoras». Mientras que los manuales de física tienden a no apartarse de las ideas cuya utilidad está

establecida, las perspectivas más populares se entregan alegremente a conceptos que son todavía enteramente hipotéticos. El procedimiento es perfectamente sensato, los investigadores se pasan la mayor parte del tiempo en la frontera, pensando en posibilidades que aún no han pasado a formar parte de la tradición. Nuestro objetivo es el de asumir las ideas sobre las que tenemos excelentes razones para pensar que seguirán formando parte de las herramientas de trabajo de los profesionales de la física dentro de cien años.

\*\*\*

Es muy grato para mí poder expresar mi agradecimiento a la enorme ayuda recibida a lo largo del camino. Scott Aaronson, Justin Clarke-Doane y Matt Strassler me han proporcionado un intercambio inestimable y me han salvado de algo más que unas pocas formas de expresión desacertadas. Jason Torchinsky es el autor de las bellas ilustraciones. Mi editor, Stephen Morrow, me ha prestado todo su apoyo y toda su perspicacia, como siempre, y mi agente, Katinka Matson, me ha ayudado a dar forma a un proyecto que era complicado. El concurso de Alice Dalrymple, Tiffany Estreicher, Dora Mak, Nakeesha Warner y Melanie Muto ha sido vital para el proceso de producción. La idea del libro surgió de una serie de vídeos que realicé durante la pandemia de la COVID-19, inspirado por las clases online de escritura dramática impartidas por mi amiga Lauren Gunderson. Y, por supuesto, no podré agradecer lo bastante a Jennifer Ouellette su asesoramiento en la redacción, su apoyo moral, y tantas cosas más.

Si desea ver los vídeos, o consultar otros materiales complementarios, puede visitar: [presposterousuniverse.com/biggestideas/](https://presposterousuniverse.com/biggestideas/).