

Jim Al-Khalili

# El mundo según la física



**Alianza** editorial  
El libro de bolsillo

Título original: *The World According to Physics*  
Traducción de Dulcinea Otero-Piñeiro  
Revisión científico-técnica de David Galadí-Enríquez,  
doctor en física

Diseño de colección: Estudio de Manuel Estrada con la colaboración de Roberto Turégano y Lynda Bozarth  
Diseño de cubierta: Manuel Estrada  
Fotografía de Lucía M. Diz y Miguel S. Moñita

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, plagiaren, distribuyeren o comunicaren públicamente, en todo o en parte, una obra literaria, artística o científica, o su transformación, interpretación o ejecución artística fijada en cualquier tipo de soporte o comunicada a través de cualquier medio, sin la preceptiva autorización.



Copyright © 2020 by Jim Al-Khalili  
© de la traducción: Dulcinea Otero-Piñeiro, 2021  
© Alianza Editorial, S. A., Madrid, 2021  
Calle Juan Ignacio Luca de Tena, 15  
28027 Madrid  
[www.alianzaeditorial.es](http://www.alianzaeditorial.es)

ISBN: 978-84-1362-309-2  
Depósito legal: M. 4.937-2021  
Printed in Spain

Si quiere recibir información periódica sobre las novedades de Alianza Editorial, envíe un correo electrónico a la dirección: [alianzaeditorial@anaya.es](mailto:alianzaeditorial@anaya.es)

# Índice

9	Prólogo
17	1. El asombro de comprender
35	2. La escala
57	3. El espacio y el tiempo
80	4. La materia y la energía
101	5. El mundo cuántico
124	6. La termodinámica y la flecha del tiempo
145	7. La unificación
164	8. El futuro de la física
198	9. La utilidad de la física
215	10. El pensamiento físico
233	Agradecimientos
237	Lecturas adicionales
245	Índice analítico



# Prólogo

Este libro es una oda a la física.

Me enamoré por primera vez de la física cuando era adolescente. Reconozco que en parte se debió a que caí en la cuenta de que se me daba bien. La asignatura me parecía una mezcla atractiva de acertijos por resolver y sentido común, y disfrutaba trasteando con las ecuaciones, manipulando los símbolos algebraicos e introduciendo números para que desvelaran los secretos de la naturaleza. Pero también reparé en que, si quería obtener una respuesta satisfactoria para los numerosos interrogantes insondables que bullían en mi mente juvenil sobre la naturaleza del universo y el significado de la existencia, tendría que estudiar física. Quería saber de qué estamos hechos, de dónde venimos, si el universo tiene un principio o un fin, si es finito o si se extiende hasta la infinidad, qué era aquello de la mecánica cuántica que había oído mentar a mi padre, cuál es la naturaleza del tiempo. Mis ansias por dar respuesta a estas preguntas me animaron a dedicar la vida al estudio de la física. Ahora tengo respuestas para algunos de aquellos interrogantes; otras las sigo buscando.

Hay quien recurre a la religión o a alguna otra ideología o sistema de creencias para dar respuesta a los misterios de la vida. Pero para mí no hay nada como el cuidadoso

proceso de formular hipótesis, ponerlas a prueba e inferir deducciones sobre el mundo, que son el sello distintivo del método científico. Los conocimientos alcanzados a través de la ciencia (y de la física en particular) sobre la composición y el funcionamiento del mundo son, en mi opinión, no ya una de las numerosas vías que existen, todas ellas igual de válidas, para acceder a la «verdad» sobre la realidad, sino la *única* forma fiable de lograrlo.

Es indudable que muchas personas no han caído nunca rendidas a los pies de la física como lo hice yo. Tal vez renunciaron a estudiar ciencias porque decidieron (o quizá alguien les dijo) que es una materia difícil (o solo para bichos raros). Y, desde luego, entender las sutilezas de la mecánica cuántica puede acabar dando dolor de cabeza. Pero todo el mundo puede y debe valorar las maravillas del universo, y para adquirir unos conocimientos básicos no hace falta dedicar una vida entera a su estudio. En este libro me he propuesto describir por qué es tan fascinante la física, por qué es una ciencia tan esencial y por qué es crucial para interpretar el mundo. La física actual tiene un alcance y una extensión impresionantes. Es asombroso que ahora sepamos de qué está hecho (casi) todo lo que vemos en el mundo y cómo se sostiene; que podamos rastrear la evolución de todo el universo hasta tan solo fracciones de segundo después del surgimiento del mismísimo espacio y el mismísimo tiempo; que a través del conocimiento de las leyes físicas que rigen la naturaleza hayamos desarrollado (y sigamos haciéndolo) tecnologías que nos han cambiado la vida. Mientras escribo estas líneas vuelvo a preguntarme: ¿cómo puede haber alguien que *no* ame la física?

Este libro aspira a ofrecer una introducción a algunas de las ideas más profundas y fundamentales de la física. Pero los temas tratados en él seguramente no coincidirán con los que estudiamos en el colegio. Para algunos lectores, el libro será una primera invitación a adentrarse en la física, una invitación que los seducirá para ahondar aún más en ella, tal vez incluso para dedicarle una vida de estudio y descubrimiento, como me pasó a mí. Para otras personas que quizá accedieran a ella con mal pie en una etapa anterior, podría servir como una nueva introducción. Muchas tal vez se limiten a maravillarse al descubrir lo lejos que ha llegado la humanidad en sus ansias por comprender.

Para transmitir unos conocimientos esenciales sobre lo que revela la física acerca de la naturaleza de nuestro mundo, he seleccionado una serie de conceptos fundamentales de la física moderna para ilustrar de qué manera están interconectados. Con este fin analizaremos el inmenso alcance de este panorama conceptual, que va desde la física de las escalas cósmicas más grandiosas hasta el nivel cuántico más insignificante; desde la aspiración de la comunidad física de unificar las leyes de la naturaleza hasta su búsqueda de los principios físicos más simples capaces de gobernar la vida; desde las fronteras especulativas de la investigación teórica hasta la física que subyace a las experiencias y tecnologías de la vida cotidiana. Asimismo expondré algunos planteamientos novedosos: ideas que los físicos hemos aprendido a aceptar, pero que no hemos sabido transmitir a quienes están fuera de nuestro círculo de especialistas más estrecho. Por ejemplo, a una escala subatómica, las

partículas individuales se comunican entre sí de manera instantánea a pesar de estar muy alejadas, lo que supone un desafío para el sentido común. Esta propiedad, llamada deslocalización, puede forzarnos a la larga a revisar toda la interpretación de la estructura del espacio en sí. Pero, por desgracia, muchas personas ajenas a la física y, de hecho, también algunas dedicadas a su estudio, no comprenden o malinterpretan lo que esto significa en realidad.

Una de las críticas que reciben muchos libros de divulgación científica que abordan conceptos fundamentales de la física (por lo común escritos por físicos teóricos) es que no siempre ayudan al público lego a captar el verdadero significado de esos conceptos. En mi opinión esto se debe a que los autores, físicos que de verdad los entienden y que escriben los artículos especializados y proponen teorías nuevas, no siempre son los mejores explicando sus propias ideas. Pero, al mismo tiempo, quienes tienen más experiencia y capacidad para informar sobre su trabajo al público general no siempre cuentan con un conocimiento lo bastante profundo de ciertos conceptos como para trasladar algo más que meras analogías. Y, aunque entiendas la física y seas capaz de transmitirla con eficacia (o eso espero) a personas que no saben física, no es pequeño el desafío de explicar términos como «invariancia gauge», «dualidad», «inflación eterna», «principio holográfico», «teoría de campos conforme», «espacios anti-de Sitter» o «energía del vacío» de un modo que aporte un entendimiento real de la física implicada y sin recurrir a matemáticas complejas. He puesto todo de mi parte para lograrlo, pero bien podría ocurrir que algunos



lectores se queden con la impresión de que se puede hacer mejor. Y, por supuesto, será verdad.

No obstante, quien desee ahondar más en alguno de los temas que se abordan por encima en esta obra, encontrará muchos volúmenes que lo consiguen con brillantez. Al final del libro he incluido una relación con algunos de los títulos que considero más accesibles y esclarecedores. Muchos de esos libros describen el devenir del avance científico (cómo ha evolucionado la física a lo largo de milenios desde los griegos de la Antigüedad; cómo se lograron ciertos descubrimientos, y cómo se propusieron y descartaron determinadas teorías e hipótesis). Estas obras suelen centrarse en las revoluciones que desbancaron concepciones previas sobre el universo, y hablan sobre los protagonistas principales de esos acontecimientos históricos. En esta obra breve, en cambio, no me centraré en lo lejos que hemos llegado, ni hablaré mucho sobre lo lejos que tenemos que llegar (porque no lo sé y, también, porque sospecho que aún nos queda un largo camino), pero sí abordaré en el capítulo 8 lo que *sabemos* que no sabemos.

Tampoco apoyaré aquí ninguna teoría particular. Por ejemplo, al hablar sobre la reconciliación de la mecánica cuántica con la relatividad general (el santo grial de la física teórica moderna) no me inclinaré por ninguno de los dos campos de trabajo existentes para llegar a ese objetivo: no defiendiendo la teoría de cuerdas ni soy un apasionado de la gravitación cuántica de lazos<sup>1</sup>, puesto que ninguna de esas teorías cae dentro de mi especialidad; y en relación con el

1. Más adelante explicaré, por supuesto, lo que implican estas ideas.

significado de la mecánica cuántica, no me entusiasma ni la interpretación de Copenhague ni la interpretación de la pluralidad de mundos<sup>2</sup>. Pero esto no impide que plantee cierta polémica sobre estos temas de tanto en tanto.

Además procuraré no enredarme demasiado en reflexiones filosóficas o metafísicas, aunque siempre surgen tentaciones al exponer algunas de las ideas más fundamentales de la física, ya sea en relación con la naturaleza del espacio y el tiempo, con las diversas interpretaciones de la mecánica cuántica, o incluso con el significado de la propia realidad. Con esto no digo que la física no necesite la filosofía. Tal vez le sorprenda saber que aún no nos hemos puesto de acuerdo ni tan siquiera en si el objetivo de la física consiste en averiguar cómo es el mundo *en realidad* (o sea, alcanzar alguna verdad definitiva que espera ahí fuera a ser descubierta), tal como pensaba Einstein, o si debe ser más bien la construcción de modelos del mundo para acercarnos al máximo a decir todo lo que se puede en la actualidad sobre la realidad, una realidad que tal vez no lleguemos a conocer nunca. Esto da una idea sobre lo determinante que es la aportación de la filosofía para mi materia de estudio. Y en la cuestión anterior, estoy del lado de Einstein.

En resumen, defenderé que la física aporta las herramientas necesarias para comprender todo el universo. El estudio de la física es una búsqueda de explicaciones, pero para embarcarse en esa búsqueda debemos, en primer lugar, plantearnos las preguntas adecuadas, algo en lo que son muy buenos los filósofos.

2. También esto lo explicaré más adelante.

De modo que comenzaremos este viaje dentro de un paradigma mental con la humildad adecuada, uno que, siendo sinceros, compartimos todos: niños, adultos y generaciones pasadas y futuras; un marco de desconocimiento. Si reflexionamos sobre lo que todavía no sabemos, podemos plantearnos cuál es la mejor manera de averiguarlo. Lo que nos ha brindado una imagen cada vez más precisa del mundo que conocemos y amamos son las numerosas preguntas que nos hemos formulado a lo largo de la historia de la humanidad.

He aquí el mundo según la física.



# 1. El asombro de comprender

Aunque los relatos siempre serán una parte esencial de la cultura humana, incluso en ciencia (y la vida sería mucho más pobre sin ellos), la ciencia moderna ha reemplazado en la actualidad muchos de los mitos antiguos y de las creencias supersticiosas asociadas a ellos. Un buen ejemplo de la desmitificación que han experimentado las estrategias para comprender el mundo lo ofrecen los mitos de la creación. Desde los albores de la historia, la humanidad ha inventado relatos sobre los orígenes del mundo, así como deidades instrumentales para su creación, desde el dios sumerio Anu, señor de los cielos, hasta los mitos griegos de Gaia, creada a partir del Caos, y los mitos del Génesis de las religiones abrahámicas, aún hoy consideradas verdades literales en numerosas sociedades del mundo. A muchas personas no científicas les podrá parecer que las teorías cosmológicas modernas sobre los orígenes del universo no son de por sí mejores que los mitos

religiosos a los que sustituyen (y si consideramos algunas de las ideas más especulativas de la física teórica actual, puede que usted mismo opine que quienes piensan así tienen algo de razón). Pero a partir del análisis racional y de una observación cuidadosa (un proceso concienzudo de comprobación y acumulación de pruebas científicas, en lugar de la aceptación de historias y explicaciones con una fe ciega) podemos afirmar ahora con bastante convencimiento que sabemos mucho sobre el universo. También podemos decir con seguridad que los misterios que quedan no tienen por qué atribuirse a algo sobrenatural. Son fenómenos que aún no comprendemos y que esperamos entender algún día a través de la razón, el estudio racional y, sí..., la física.

Al contrario de lo que defenderán algunas personas, el método científico *no es* tan solo una forma más de contemplar el mundo, ni tampoco es otra ideología cultural o un sistema de creencias. Es el procedimiento que nos permite conocer la naturaleza por ensayo y error, a través de la experimentación y la observación, a partir de una postura abierta a reemplazar ideas que se revelan erróneas o incompletas por otras mejores, y mediante el reconocimiento de patrones en la naturaleza y de belleza en las ecuaciones matemáticas que describen esos patrones. A lo largo de todo ese proceso profundizamos en el conocimiento existente y nos acercamos más a esa «verdad», a la forma en que es el mundo *realmente*.

No se puede negar que la comunidad científica está formada por personas con los mismos sueños y prejuicios que el resto de la humanidad, y con puntos de vista que no son del todo objetivos. Lo que un grupo científí-

co denomina «consenso» otro lo considera un «dogma». Lo que se contempla como un hecho consolidado en una generación se observa como un ingenuo malentendido en la siguiente. Igual que en la religión, la política o el deporte, siempre se ha discutido dentro de la ciencia. A menudo corremos el peligro de que, mientras un problema científico permanece sin resolver o, al menos, abierto a la duda razonable, las posturas de cada bando se conviertan en férreas ideologías. Cada punto de vista tiene sus matices y complejidades, y sus defensores pueden volverse tan inflexibles como en cualquier otro debate ideológico. Y, al igual que sucede con los comportamientos sociales dentro de la religión, la política, la cultura, la raza o el género, a veces se necesita una nueva generación para romper con las ataduras del pasado y avanzar en el debate.

Pero hay otra diferencia crucial entre la ciencia y esas disciplinas. Una sola observación atenta o un solo resultado experimental pueden anular una idea científica generalizada o una vieja teoría que se queda obsoleta, y reemplazarlas por una concepción nueva del mundo. Esto significa que las teorías y explicaciones de los fenómenos naturales más fiables, las que más confianza infunden, son aquellas que han superado la prueba del tiempo. Es la Tierra la que gira alrededor del Sol y no al revés; el universo se está expandiendo, no es estático; la velocidad de la luz en el vacío siempre tiene el mismo valor, con independencia de la velocidad a la que se esté moviendo quien la mide; etcétera. Cuando se alcanza un descubrimiento científico importante que trastoca nuestra cosmovisión, no todos los científicos lo aceptan de in-

mediato, pero ese es *su* problema. El avance de la ciencia es inexorable, lo cual, por cierto, *siempre* es bueno: el conocimiento y el esclarecimiento siempre son mejores que la ignorancia. Empezamos sin saber, pero perseguimos el conocimiento... y, aunque discutamos por el camino, no podemos cerrar los ojos a lo descubierto. En lo que respecta a la comprensión científica del mundo, la idea de que la «ignorancia es fuente de dicha» es una pampolina. En palabras de Douglas Adams: «En cualquier momento preferiría el asombro de comprender frente al asombro de la ignorancia»<sup>1</sup>.

## Lo que no sabemos

También es cierto que descubrimos sin cesar lo mucho que aún nos queda por conocer. ¡Cuanto más crece el conocimiento, más conscientes somos de nuestra ignorancia! En cierto modo, esta es la situación en la que se encuentra la física en este momento, tal como explicaré. Estamos en un instante de la historia que muchos especialistas de la física contemplan, si no como una crisis de la disciplina, sí al menos como una olla a presión. Da la sensación de que algo tiene que ceder. Hace algunas décadas físicos tan notables como Stephen Hawking plantearon: «¿Se vislumbra el fin de la física teórica?»<sup>2</sup>

1. Douglas Adams, *The Salmon of Doubt: Hitchhiking the Galaxy One Last Time* (Nueva York: Harmony, 2002), 99.

2. Así rezaba el título de un artículo que Hawking escribió en 1981: S. W. Hawking, «Is the end in sight for theoretical physics?», *Physics Bulletin* 32, núm. 1 (1981): 15-17.



con una «teoría del todo» posiblemente a la vuelta de la esquina? Decían que solo faltaban unos cuantos detalles. Pero se equivocaban, y no era la primera vez. Los físicos habían manifestado impresiones similares hacia el fin del siglo XIX; después llegó una explosión de descubrimientos (el electrón, la radiactividad y los rayos X) que no podían explicarse con la física conocida de aquel entonces y que propiciaron el nacimiento de la física moderna. Muchos físicos tienen hoy la sensación de que estamos al borde de otra revolución dentro de la física del mismo calado que la de hace un siglo con el advenimiento de la teoría de la relatividad y la mecánica cuántica. No digo que estemos a punto de descubrir algún fenómeno fundamental, como los rayos X o la radiactividad, pero quizá haga falta otro Einstein para acabar con el estancamiento actual.

El Gran Colisionador de Hadrones no ha dado continuidad al logro que alcanzó en 2012 con la detección del bosón de Higgs, que confirmó la existencia del campo de Higgs (del que hablaré más adelante); muchos físicos esperaban que a estas alturas ya se hubieran descubierto otras partículas nuevas, lo que ayudaría a resolver viejos enigmas. Y seguimos sin esclarecer la naturaleza de la materia oscura que mantiene cohesionadas las galaxias o de la energía oscura que está desgarrando el universo; ni tampoco tenemos respuestas para preguntas esenciales como por qué hay más materia que antimateria; por qué están tan bien afinadas las propiedades del universo para permitir la existencia de estrellas, planetas y la propia vida; si hay un multiverso; o si hubo algo antes de la Gran Explosión (*Big Bang*) que creó el universo

que observamos. Aún queda mucho por explicar. Y, sin embargo, cuesta no asombrarse ante lo logrado hasta ahora. Aunque podría resultar que algunas teorías científicas estén conectadas entre sí a un nivel más profundo de lo que pensamos, mientras que otras tal vez se revelen completamente equivocadas, nadie puede negar lo lejos que hemos llegado.

En ocasiones, con la obtención de nuevos datos empíricos reparamos en que andamos descarriados. Otras veces basta con refinar una idea que se revela no errónea, sino una ligera aproximación que se debe perfeccionar para adquirir una visión más fiel de la realidad. Hay algunos campos fundamentales de la física con los que no estamos completamente satisfechos, de los que en el fondo sabemos que no se ha dicho la última palabra, pero en los que nos seguimos basando de momento porque nos resultan útiles. Un buen ejemplo lo ofrece la ley de la gravitación universal de Newton. Todavía porta el grandilocuente apelativo de «ley» porque los científicos de aquella época estaban tan convencidos de que era algo definitivo que le asignaron una categoría superior a la de una mera teoría. El apelativo se quedó, a pesar de que ahora sabemos que le atribuyeron una credibilidad inmerecida. La teoría general de la relatividad de Einstein (nótese que recibe el nombre de «teoría») reemplazó la ley de Newton porque aporta una explicación más profunda y precisa de la gravitación. Y, sin embargo, seguimos usando las ecuaciones de Newton para calcular las trayectorias de vuelo de las misiones espaciales. Las predicciones de la mecánica newtoniana no son tan precisas como las de la relatividad de Einstein,

pero siguen siendo lo bastante buenas para casi cualquier cálculo de la vida cotidiana.

Otra teoría en la que nos seguimos basando es el modelo estándar de la física de partículas. Consiste en una amalgama de dos teorías matemáticas independientes llamadas modelo electrodébil y cromodinámica cuántica, y que juntas describen las propiedades de todas las partículas fundamentales conocidas y de las fuerzas que actúan entre ellas. Algunos físicos contemplan el modelo estándar como un mero recurso provisional hasta que se descubra una teoría unificada más exacta. Y, sin embargo, es llamativo que en su estado actual el modelo estándar pueda decirnos todo lo que necesitamos saber sobre la naturaleza de la materia: cómo y por qué se organizan los electrones en torno a los núcleos atómicos, cómo interaccionan los átomos para formar moléculas, cómo se ensamblan esas moléculas para integrar todo lo que nos rodea, cómo interacciona la materia con la luz (y, por tanto, cómo se explican casi todos los fenómenos). Un solo aspecto de ella, la electrodinámica cuántica, sustenta toda la química al nivel más profundo.

Pero el modelo estándar no puede ser la última palabra sobre la naturaleza de la materia, porque no incluye la gravitación y no explica la materia oscura ni la energía oscura, y entre las dos conforman la mayoría de lo que compone el universo. Dar respuesta a algunas preguntas conduce de manera natural a otras, y los especialistas siguen buscando la física que hay «más allá del modelo estándar» con la intención de resolver estos interrogantes persistentes, pero cruciales.

## Cómo avanzamos

Más que ninguna otra disciplina, la física avanza a través de la interacción continua entre la teoría y la experimentación. Las teorías solo superan la prueba del tiempo si los experimentos siguen confirmando sus pronósticos. Una teoría es buena cuando emite predicciones novedosas que se pueden demostrar en el laboratorio, pero si esos resultados experimentales entran en conflicto con la teoría, entonces hay que modificarla o incluso descartarla. Y al revés, los experimentos de laboratorio apuntan a veces hacia fenómenos inexplicados que exigen nuevas interpretaciones teóricas. En ninguna otra ciencia asistimos a una colaboración tan hermosa. Los teoremas de las matemáticas puras se demuestran a través de la lógica, la deducción y el empleo de verdades axiomáticas. No precisan una validación en el mundo real. En cambio, la geología, la etología o la sicología conductual son en su mayoría ciencias observacionales donde el avance del conocimiento se logra a través de una recopilación meticulosa de datos extraídos del mundo natural o a través de pruebas de laboratorio diseñadas con esmero. Pero la física solo consigue avanzar cuando la teoría y la experimentación trabajan codo con codo, afianzándose y mostrándose mutuamente el siguiente asidero para ascender por el precipicio.

Arrojar luz sobre lo desconocido es otra buena metáfora sobre cómo desarrollan los científicos sus teorías y modelos, y cómo diseñan sus experimentos para poner a prueba algún aspecto relacionado con el funcionamiento del mundo. Cuando se trata de buscar ideas nuevas en

física encontramos dos grandes clases de investigadores en términos generales. Imagine que vuelve a casa caminando una noche oscura y sin luna y de pronto se da cuenta de que tiene un agujero en el bolsillo del abrigo por el que se le han caído las llaves en algún punto del trecho recorrido. Usted sabe que tienen que estar en algún lugar del suelo por el que acaba de transitar, así que vuelve sobre sus pasos. Pero ¿mirará tan solo en las partes del pavimento iluminadas, las que están justo debajo de las farolas que hay por el camino? Al fin y al cabo, aunque esas zonas no cubren más que una parte del recorrido, al menos tiene la seguridad de que encontrará las llaves si están en alguna de ellas. ¿O buscará a tientas en las manchas de oscuridad que quedan entre cada haz de luz artificial? Lo más probable es que las llaves se cayeran en alguna de ellas, pero también será más difícil encontrarlas.

De manera similar, hay físicos aficionados a las farolas y estudiosos de la oscuridad. Los primeros van a lo seguro y desarrollan teorías que se pueden comprobar mediante la experimentación (miran allí donde se puede ver). Esto significa que suelen ser menos ambiciosos en la formulación de ideas novedosas, pero logran un índice mayor de éxito para el avance del conocimiento, aunque de manera progresiva: con evolución, no con revolución. En cambio, los estudiosos de la oscuridad son los que proponen las ideas más originales y especulativas, las que no resultan nada fáciles de comprobar. Tienen menos posibilidades de éxito, pero la recompensa es mayor si dan en el clavo y sus descubrimientos pueden desencadenar cambios de paradigma en el conocimiento. Esta