

## ¿Por qué física cuántica y relativista?

“Hay más cosas en el cielo y en la tierra, Horacio, de las que sueña nuestra filosofía”.

*Hamlet*, William Shakespeare (1603)

“Guárdate de él, guárdate de él como de la peste. Es el sentido común el que con los medios comunes de conocer juzga, de tal modo que en tierra en que un solo mortal conociera el microscopio y el telescopio disputaríanle sus coterráneos por hombre falto de sentido común cuando les comunicase sus observaciones, juzgando ellos a simple vista, que es el instrumento del sentido común”.

*Amor y pedagogía*, Miguel de Unanuno (1902)

La física “de todos los días”, la que estudiamos en el colegio, la de los planos inclinados y las poleas, los objetos que se dejan caer o los trenes que van desde A hasta B a una velocidad X, esa física no es ni cuántica ni relativista. Naturalmente, esto no es un problema ni de la física ni de las teorías cuánticas o relativistas. Sencillamente, para describir lo que sucede en esos problemas con objetos macroscópicos y que se mueven a velocidades relativamente pequeñas, ni la física cuántica ni la teoría de la relatividad nos sirven, en general, para nada. De ahí el absurdo de pretender sacar grandes conclusiones sobre la vida a partir de cosas que se salen de su rango de aplicación: ya saben, “la física cuántica demuestra que no existe esto o aquello”, “Einstein ya dijo que...”, etc. Todas esas cosas no suelen tener demasiada relación con nuestra vida diaria (salvo que uno sea un electrón o, qué se yo, un agujero negro). Para nuestra vida cotidiana suelen ser más útiles las cosas de las leyes de Newton: que la fuerza es igual a la masa por aceleración, que los objetos caen con la misma aceleración independientemente de su masa, que para cada fuerza que hacemos existe una fuerza de reacción de igual

valor y sentido opuesto... Pero supongo que estas verdades que podemos experimentar con facilidad en cualquier momento no nos resultan tan atractivas.

Entonces, ¿para qué queremos la física cuántica y la relatividad? Sencillamente, porque en la naturaleza hay más cosas que las que vemos en nuestra física de todos los días. Por ejemplo, mi masa es aproximadamente 65 kilogramos, pero un electrón tiene una masa de 0,0009 kilogramos. ¿Es razonable esperar que la descripción física de las cosas que me suceden a mí sea la misma que en el caso del electrón, siendo nuestras masas tan diferentes? No es sorprendente entonces que haya que recurrir a nuevas ideas, las de la física cuántica, para explicar la física del electrón.

Usain Bolt alcanzó una velocidad máxima de aproximadamente 12 metros por segundo<sup>1</sup> y un tren español de alta velocidad puede llegar hasta unos 85 metros por segundo. El sonido se desplaza por el aire a unos 340 metros por segundo y este valor nos sirve de referencia para medir las velocidades más alucinantes que nos encontramos en nuestra vida, que son las que alcanzan algunos aviones. Sin embargo, la luz se mueve muchísimo más rápido: a unos 300 millones de metros por segundo. Por eso quizá tampoco es sorprendente que para describir la física de algo que se mueva a velocidades cercanas a la de la luz tenga que recurrir a ideas nuevas: las de la teoría de la relatividad.

Por tanto, la física cuántica y la relatividad completan la física de Newton de todos los días, ocupándose de aspectos de la naturaleza que no son aquellos para los que esa física fue concebida. A pesar de la gran influencia del libro de Thomas S. Kuhn, *La estructura de las revoluciones científicas*, con sus “cambios de paradigma”, lo cierto es que las teorías físicas no se sustituyen unas a otras mediante revoluciones, sino que las

1. Puede consultarse, para ampliar información, <https://bit.ly/3eKZkP8>.

nuevas teorías complementan a las anteriores, extendiendo el rango de validez de nuestro conocimiento. Las teorías físicas aceptadas en un momento dado de la historia han alcanzado ese lugar debido a que han sido comprobadas experimentalmente una y otra vez. En ese sentido, no pueden estar equivocadas y ser sustituidas sin más por otras.

Lo primero que tiene que hacer una aspirante a nueva teoría es explicarnos cómo se relaciona con las teorías anteriores que sabemos verdaderas: si la nueva teoría puede aplicarse a los mismos experimentos que la antigua teoría, tendrá que dar los mismos resultados, ya que la antigua teoría explicaba correctamente esos experimentos. Así, por ejemplo, como veremos con mucho más detalle más adelante en este libro, las fórmulas que expresan las leyes de la relatividad de Einstein son las mismas que las de las leyes de Newton, salvo un factor de corrección que depende de la velocidad de los objetos que estemos considerando. Para las velocidades de nuestra vida diaria (Usain Bolt, el AVE, incluso un avión supersónico), ese factor de corrección es básicamente despreciable. Puedo empeñarme en calcularlo, y es divertido hacerlo alguna vez en la vida, pero el resultado no resulta muy práctico: las diferencias que me daría, por ejemplo, para la medida del tiempo no podrían ser detectadas por ningún reloj en el mercado. Esto no quiere decir, claro, que la teoría de la relatividad esté mal o que no sirva para nada. Cuando consideramos velocidades mucho más grandes y nos acercamos a la velocidad de la luz, el factor de corrección ya no puede despreciarse.

También puede haber situaciones en nuestra vida en las que requiramos una precisión tan grande que no podamos despreciar una corrección relativista, aunque esta sea pequeña. Cada vez que pido un taxi en Madrid usando una aplicación del teléfono móvil, el aparato calcula mi localización gracias a que se comunica mediante ondas electromagnéticas con el sistema de posicionamiento global (GPS, por sus siglas

en inglés). Este sistema es un conjunto de satélites orbitando a miles de kilómetros de la Tierra: si conozco mi distancia a tres de estos satélites, puedo saber mi posición en la Tierra. Y esas distancias pueden calcularse si sabemos el tiempo que tarda la señal en ir desde el satélite hasta mí: la distancia será el tiempo por la velocidad de la señal, que como es una onda electromagnética, será la velocidad de la luz.

Ahora bien, la velocidad de la luz es tan enorme que en una millonésima de segundo recorre centenares de metros. Así que, si me equivoco en una millonésima de segundo en la medida del tiempo (un error que un reloj normal ni siquiera detectaría), los errores en la localización serían de centenares de metros, con el consiguiente enfado del taxista. Así que los satélites están dotados de relojes atómicos muy precisos que son capaces de incorporar los factores de corrección por efectos relativistas, de manera que los ocasionales errores de localización se reducen a unos pocos metros. Acuérdesse de Einstein cada vez que pida un taxi.

De todo lo anterior tampoco se deduce que la física de Newton esté mal, ni mucho menos. Como todas las teorías físicas, tiene su rango de validez en el que funciona estupendamente. Las leyes de Newton no pretendían usarse para calcular distancias a un sistema de satélites con precisión de metros, así que no es tan sorprendente que fallen ligeramente en ese caso.

La física cuántica y la relatividad son los dos pilares de la física moderna y, por tanto, del pensamiento humano. Extienden nuestro conocimiento de la naturaleza, nuestra capacidad para predecirla y explicarla, y para producir nuevas tecnologías, a terrenos que van más allá de lo que podemos percibir y experimentar con nuestros sentidos. En muchas ocasiones se las presenta como dos edificios teóricos separados e incommunicados entre sí. A menudo, incluso, se las muestra enfrentadas, incompatibles. Para ello, se recurre hasta la saciedad a que Einstein, el padre de la relatividad moderna,

nunca aceptó del todo las ideas de la física cuántica (a pesar de haber contribuido decisivamente al nacimiento de la teoría cuántica con su explicación del efecto fotoeléctrico). Quizá convendría recordar más a menudo que Einstein murió en 1955, mucho antes de que los experimentos confirmaran la realidad del entrelazamiento cuántico y descartaran, gracias a las desigualdades de Bell, cualquier alternativa razonable a la física cuántica.

En el libro *Verdades y mentiras de la física cuántica* (Sabín, 2020) dedicaba un capítulo entero a desmentir mitos y malentendidos sobre física cuántica que aparecen comúnmente en los medios de comunicación, las redes sociales y la cultura popular. Uno de ellos era la falsa creencia, basada en malas explicaciones del entrelazamiento cuántico, de que en física cuántica hay cosas que ocurren a velocidades más rápidas que la de la luz, en una suerte de transmisión instantánea de información. En otras palabras, si eso fuera cierto (que no lo es), estaríamos diciendo que la física cuántica no cumple con los principios básicos de la relatividad especial. Por supuesto, en el libro demostramos que eso es mentira, pero conviene detenerse un momento más en este asunto. ¿Cómo podría haber sido cierto? El hecho de que algo pudiera viajar más rápido que la luz violaría uno de los principios básicos de la relatividad y, por tanto, una de las características fundamentales de la naturaleza, comprobada durante décadas de experimentos. Si la física cuántica contradijera de manera tan flagrante los principios de la relatividad, no podría ser una buena teoría física. Y, sin embargo, también lo es, ya que también ha sido comprobada por décadas de experimentos.

Como ejemplo, tal vez recuerden el gran revuelo informativo que causó el anuncio en septiembre de 2011 de que un experimento llamado OPERA había detectado que unos neutrinos viajaban a velocidades más rápidas que la de la luz. Los telediarios anunciaron una gran revolución en la física, “Einstein se equivocaba”, etc. Finalmente, unos meses

después, resultó que había un cable que estaba suelto. No podía ser de otra manera. Un tiempo antes, el físico Sheldon Glashow había escrito un discreto artículo en el que mostraba que, si aquello era cierto, contradecía varias décadas de experimentos en física de partículas: en otras palabras, no podía ser cierto. Y claro, no lo era.

En realidad, aunque se nos presenten habitualmente la física cuántica y la relatividad como incompatibles y enfrentadas, esto no es así en absoluto. La combinación de ambas teorías da lugar a la llamada “teoría cuántica de campos”, con la que se construye el “modelo estándar de las partículas elementales”, es decir, la teoría que explica el comportamiento de la naturaleza en el nivel más fundamental que nos es accesible. Gracias a dicho modelo estándar, podemos explicar y predecir el comportamiento de los electrones, de los quarks que forman los neutrones y protones, de los fotones que forman la luz, de los neutrinos..., e incluso hemos podido predecir la existencia de partículas que nunca habíamos detectado antes, como el bosón de Higgs, que fue encontrado en el llamado gran colisionador (acelerador de partículas) de hadrones (LHC, por sus siglas en inglés) en el CERN, cerca de Ginebra, en el año 2012. Lejos, por tanto, de ser incompatibles, física cuántica y relatividad se combinan para levantar el edificio teórico más sólido del pensamiento humano.

A ese edificio, los físicos hemos intentado añadir un elemento más: la fuerza de la gravedad. El modelo estándar proporciona una descripción, al nivel más microscópico y fundamental posible, de tres de las cuatro fuerzas de la naturaleza: la electromagnética (que relaciona a las partículas que tienen carga eléctrica, como los electrones y los quarks que forman los protones), la nuclear fuerte (que mantiene unidos a los núcleos de los átomos a pesar de las fuerzas eléctricas de las partículas que los forman) y la nuclear débil (responsable de las desintegraciones que ocurren en los núcleos atómicos). La única fuerza restante es la de la gravedad, con la que unas

masas atraen a otras, responsable a la vez de la caída de los objetos en la superficie terrestre y del movimiento de los planetas en sus órbitas.

Einstein corrigió la ley de la gravedad de Newton, con el espíritu que hemos explicado anteriormente: la nueva ley de la gravedad einsteniana es la newtoniana más un factor de corrección que es despreciable para todas las cosas en las que usamos la gravedad en nuestra vida cotidiana (como la caída de objetos en la superficie de nuestro planeta), pero que se vuelve apreciable en situaciones en las que la gravedad es más intensa (como cerca de un agujero negro) o si queremos mucha precisión en un cálculo determinado (como en cierto ajuste fino del cálculo de la órbita de Mercurio, la llamada “precesión del perihelio”).

La descripción que hizo Einstein de la gravedad es una parte importante de su teoría de la relatividad. Sin embargo, si intentamos aplicar sin más a la gravedad las mismas herramientas con las que la teoría cuántica de campos consiguió explicar la interacción electromagnética y las interacciones nucleares, la teoría falla. De manera que, de momento, no disponemos de una teoría completa que nos dé una descripción cuántica de la gravedad. Nada nos impide, sin embargo, combinar la gravedad con la teoría cuántica de campos, siempre que nos mantengamos dentro de los límites en los que la gravedad no necesita ser tratada cuánticamente, es decir, siempre que no necesitemos una descripción microscópica, partícula a partícula, de la gravedad. Así, la teoría de la relatividad puede combinarse perfectamente con la física cuántica, incluso añadiendo la gravedad, como hizo, por ejemplo, el gran Stephen Hawking cuando demostró la existencia teórica de su famosa “radiación de Hawking” de los agujeros negros. La única limitación es que no sabemos cómo “hacer cuántica” a la propia gravedad: mientras que sabemos cómo tratar una onda electromagnética (como la luz visible, por ejemplo) “fotón a fotón”, desconocemos exactamente cómo tratar una

onda gravitacional “gravitón a gravitón”. Naturalmente, existen varias propuestas teóricas, pero ninguna tiene todavía confirmación experimental.

Por tanto, aunque nos falte una pequeña esquina por descubrir, es mucho lo que sabemos sobre cómo se relacionan la física cuántica y la relatividad para darnos una buena descripción de la naturaleza, allí donde no siempre llegan nuestros sentidos (incluido el menos fiable de todos, ese cajón de sastre individual que llamamos “sentido común”).

## **¿Qué veremos en este libro?**

En el primer capítulo presentaremos los principios básicos y las ideas esenciales de la teoría de la relatividad de Einstein, la cual se divide en dos partes: la llamada “relatividad especial” (sin gravedad) y la llamada “relatividad general” (con gravedad). Veremos que no todo es relativo, algunas cosas lo son, pero hay algunas que no, y estas últimas son tan importantes que decimos que son nuestras leyes de la física.

El capítulo segundo no pretende explicar en detalle qué es la física cuántica (lo cual ya hicimos en Sabín, 2020), pero sí dar un breve repaso por sus características esenciales, centrándonos en su relación con la relatividad. Veremos que la física cuántica no entra en contradicción en absoluto con las ideas y principios de la relatividad.

Las ideas de los dos capítulos anteriores se combinan en el capítulo tercero para dar lugar a la teoría cuántica de campos. Veremos que es una sólida descripción de la naturaleza a nivel subatómico, con un nivel asombroso de verificación experimental.

En la teoría cuántica de campos no es necesaria la gravedad. Si la añadimos, veremos en el capítulo cuarto que obtenemos una teoría llamada “teoría cuántica de campos en espacio-tiempo curvo” que nos habla de cosas alejadas de la



física de todos los días y de difícil comprobación experimental, como la radiación de Hawking, pero que cumplen una función importante en nuestro conocimiento de la naturaleza.

El único elemento que nos falta, la descripción cuántica de la propia gravedad, lo consideraremos brevemente en el capítulo quinto. Veremos cuál es el problema, las propuestas más relevantes para solucionarlo y qué perspectivas hay de realizar experimentos que resuelvan la cuestión en los próximos años.

Terminaremos en el último capítulo con un resumen de las conclusiones principales de este libro sobre la relación entre la relatividad y la física cuántica.

Se incluye también un glosario con definiciones de los términos científicos principales empleados durante el texto y una bibliografía con una selección de libros y artículos de referencia.