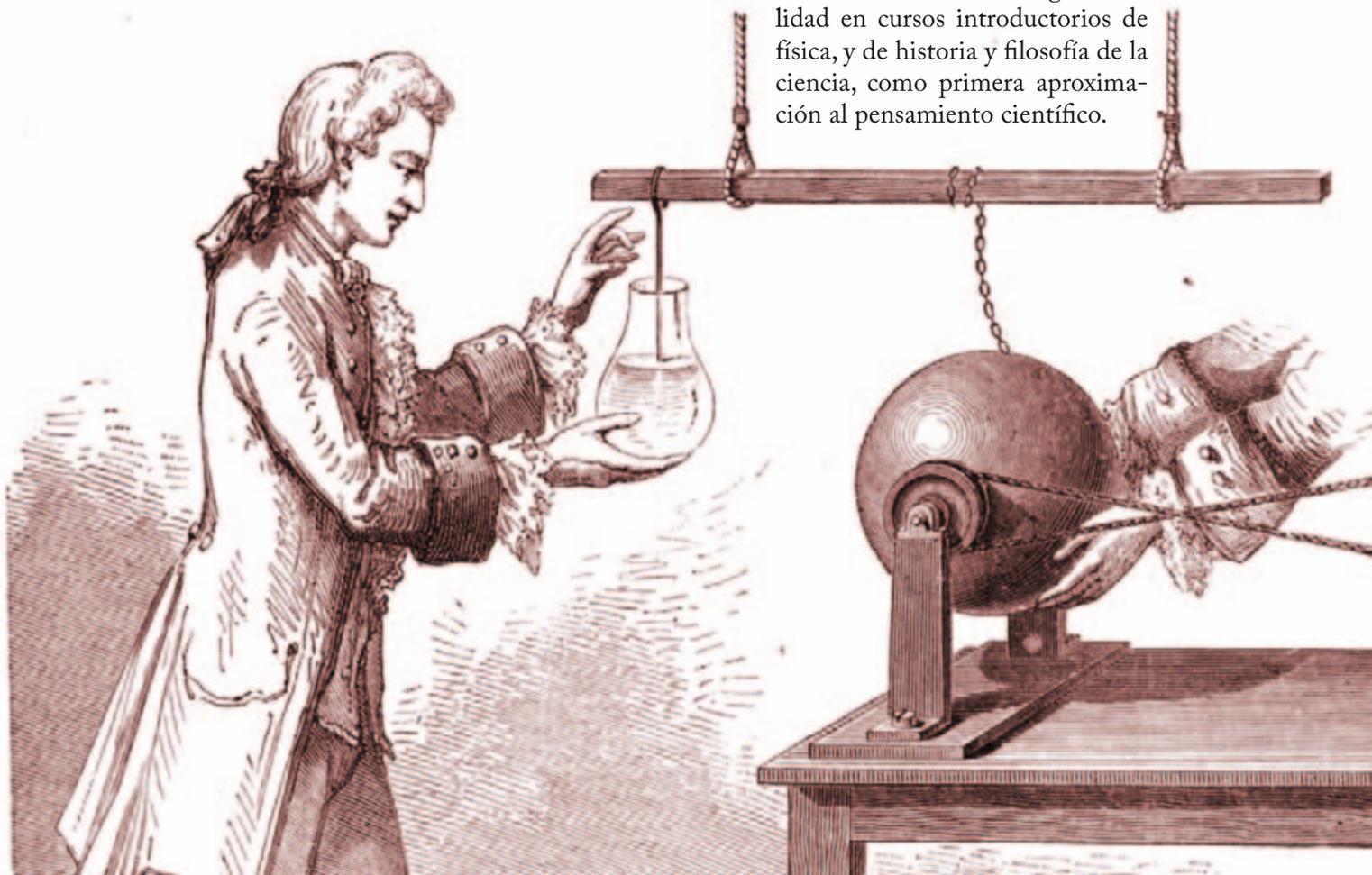


LA EVOLUCIÓN DE LA FÍSICA

GUILLERMO
PINEDA

En el segundo párrafo del prólogo de *La evolución de la física*, el libro escrito por Albert Einstein y Leopold Infeld pocos años antes de que estallara la Segunda Guerra Mundial, se advierte al lector que la obra que tiene en sus manos no es un libro de texto, sino una obra que pretende describir, a grandes rasgos, los esfuerzos que los hombres de ciencia han realizado tratando de establecer una conexión entre el mundo de las ideas y el mundo de los fenómenos. Sin embargo, a pesar de la declaración, o de la intención, de los autores, el texto en cuestión —publicado originalmente por la editorial de la Universidad de Cambridge en 1938, y reeditado por Editorial Losada con el nombre de *La física: una aventura del pensamiento*—, además de ser un excelente texto de divulgación, tiene un extraordinario valor didáctico de gran utilidad en cursos introductorios de física, y de historia y filosofía de la ciencia, como primera aproximación al pensamiento científico.



El libro fue escrito entre los años 1934 y 1936, durante una pasantía que realizó Leopold Infeld en el Instituto de Estudios Avanzados de Princeton, invitado por Einstein, como una forma de solidaridad con un colega que, al igual que él, había escapado de la persecución nazi en Europa. En el texto los autores exponen su concepción del mundo, de la ciencia y de la realidad, de manera sencilla, en un lenguaje claro y accesible a cualquier lector medianamente culto, pero quien esté al tanto de la agitación que vivía la física en las primeras décadas del siglo veinte podrá percibir la tensión subyacente en el discurso, generada por el antagonismo entre la concepción clásica del mundo, suscrita por Einstein e Infeld, y la nueva conceptualización de la física, surgida de la aparición de la mecánica cuántica y de los avances en el estudio de la interacción de la materia y la radiación, a los cuales había contribuido Einstein de manera significativa.

Desde el principio del libro los autores manifiestan su intención de describir la conexión existente entre el mundo de las ideas y el mundo de los fenómenos, empezando por señalar las claves que condujeron al establecimiento del punto de vista mecanicista de la naturaleza, y el papel que jugaron en la postulación del principio de inercia, por parte de Galileo y Newton, las experiencias idealizadas, también conocidas como experimentos mentales, las cuales se hacen necesarias ante la imposibilidad de verificar, de manera experimental, que, por ejemplo, al no estar sujeto a la acción de ninguna fuerza un cuerpo conserva su estado de movimiento de manera indefinida; o que en el vacío todos los cuerpos caen con igual aceleración, independientemente de su peso.

La experiencia sugiere, con frecuencia la intuición confunde y, a veces, la razón corrige, pero será la experimentación la que, en último término, valide lo indemostrable. De esta perspectiva surgen apreciaciones que, a primera vista, pueden resultar sorprendentes: “Los conceptos físicos son creaciones libres del espíritu humano y no

están, por más que parezca, únicamente determinados por el mundo exterior”, nos dicen Einstein e Infeld. El reconocimiento del carácter artificial de los conceptos con los que la física describe el mundo parece chocar con la aproximación ingenua a la lectura del libro de la naturaleza que prescribe Galileo, pues, más que ser descubierto, el mundo de los fenómenos también debe ser inventado, respetando, por supuesto, las restricciones que impone la experiencia. El papel de la verdad absoluta, al menos en lo que a la ciencia se refiere, empieza a ser desdibujado, o mejor, relegado a otras áreas del conocimiento; mientras que el objeto de la ciencia se define en sus propios términos, a partir de la práctica.

En el proceso de presentación de lo que los autores denominan el punto de vista mecánico de la naturaleza, dominado por la conceptualización newtoniana del mundo —caracterizada por la acción de fuerzas entre cuerpos que interactúan a distancia y de manera instantánea, o por fuerzas de contacto entre cuerpos contiguos—, se analiza una clave que habría pasado inadvertida: la equivalencia de la masa inercial y la masa gravitacional, que sirve de fundamento a la teoría general de la relatividad, que es la teoría relativista de la gravitación. Las diferencias entre los dos conceptos fundamentales que sirven de base a la mecánica, inercia y gravitación, son destacadas para, a continuación, declarar que se trata de la misma entidad. La equivalencia de la masa inercial, magnitud física asociada a la respuesta de los cuerpos sujetos a la acción de una fuerza, y la masa gravitacional, que determina la intensidad con la que un cuerpo atrae a otro, deja de ser meramente cuantitativa y se vuelve esencial. Hasta el momento en que Einstein llamó la atención sobre la diferencia conceptual entre la masa inercial y la masa gravitacional, pocos la habían advertido o mostrado alguna preocupación al respecto. La equivalencia cuantitativa entre la masa inercial y la masa gravitacional, que es el fundamento de la ley de caída de los cuerpos de Galileo, ha

sido comprobada de manera experimental con alto grado de precisión. De no ser por la estricta equivalencia cuantitativa entre estas dos magnitudes físicas, podría suceder que dos cuerpos con la misma masa inercial y diferente masa gravitacional, cayendo en condiciones similares, tuvieran diferente aceleración. Que tal situación nunca haya sido observada, y que los cálculos basados en la ley de caída conduzcan a resultados concordantes con la observación, nos permite suponer que el principio en cuestión es razonablemente confiable.

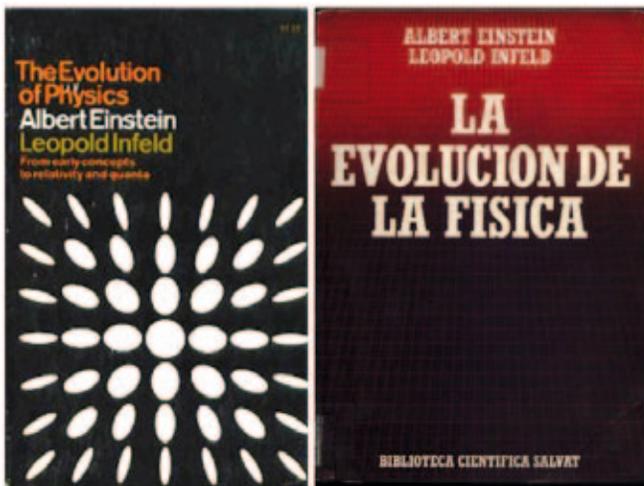
Desde la perspectiva de Einstein, y de su pretensión última respecto a la imagen del mundo, el establecimiento de la equivalencia de la masa inercial y de la masa gravitacional es un paso significativo en el propósito de construir una teoría física con el mínimo número de elementos posibles. Al eliminar la redundancia que significa tener dos conceptos aparentemente diferentes para designar la misma magnitud física, la teoría de la gravitación se simplifica y sus predicciones se hacen más inteligibles. Pero las consecuencias de este descubrimiento van más allá de la equivalencia entre inercia y gravitación, al ponerse de manifiesto una conexión profunda entre la materia y el espacio, que se refleja en la geometría. De acuerdo con la teoría de la gravitación elaborada por Einstein, la trayectoria de un cuerpo se curva en la vecindad de otro cuerpo debido a la modificación que experimenta el espacio en presencia de la materia. El surgimiento de una teoría relativista de la gravitación, caracterizada por la existencia de perturbaciones ondulatorias del campo gravitacional que se propagan a la velocidad de la luz, al igual que las ondas electromagnéticas, resuelve el problema de la interacción instantánea y a distancia implícita en la teoría newtoniana. El espacio deja de ser el escenario pasivo en el que se desarrollan los fenómenos y se convierte en parte de la acción. “La materia le dice al espacio cómo curvarse y este le dice a la materia cómo moverse”, reza una conocida expresión atribuida a Einstein, que describe esta singular

situación. La geometría se convierte en un objeto de la física, y la representación de las teorías físicas adquiere un carácter cada vez más geométrico.

No solo el espacio de la mecánica de Newton pierde su carácter absoluto, eterno e inmutable; también el tiempo, indisolublemente unido al espacio como consecuencia de la teoría especial de la relatividad, deja de ser uniforme, continuo, infinito e independiente de los fenómenos, como lo proclamara Newton, pues ahora sabemos que su ritmo depende de la distribución de materia. Diversos relojes a diferentes alturas sobre la superficie de la Tierra marchan a diferente paso, y en la vecindad de un cuerpo de gran masa y alta densidad el movimiento se congela, impidiendo que incluso la luz pueda escapar de la trampa gravitacional. Delicados experimentos que llevan al límite la precisión de las mediciones respaldan las predicciones relativistas y constituyen evidencia de que estamos ante algo más sólido que una mera especulación teórica, y que los agujeros negros son algo más que ciencia ficción.

La importancia de los logros obtenidos por las teorías del campo que se desarrollaron en la segunda mitad del siglo diecinueve se puede apreciar en toda su magnitud al compararlos con los descubrimientos astronómicos realizados gracias al modelo mecanicista desarrollado según los lineamientos de la física de Newton. Aplicado al estudio de los fenómenos que suceden en nuestro entorno, el modelo mecánico traduce la cotidianidad en términos de corpúsculos y de fuerzas que actúan a lo largo de la línea de acción y que dependen de la distancia entre los cuerpos interactuantes. Hermann von Helmholtz, el notable físico alemán que estableció las bases teóricas de la ley de la conservación de la energía a mediados del siglo diecinueve, expresó con toda claridad los alcances del ideal reduccionista de la concepción mecánica del mundo, al sentenciar que todos los fenómenos se podían explicar en términos de fuerza y materia: “La función de la ciencia habrá terminado tan pronto se cumpla la reducción de todos

los fenómenos naturales a simples fuerzas y se demuestre que esta es la única reducción posible”. Bajo el auspicio de esta concepción fue factible incorporar la termodinámica a la mecánica gracias a la interpretación del calor como una forma de movimiento microscópico de los corpúsculos que componen la materia, y de la temperatura como una medida del promedio de ese grado de movimiento. Luego de eliminar algunos conceptos innecesarios como el calórico y el flogisto, mediante el uso de conceptos más elementales como materia y movimiento, la física se hizo más sencilla y se fortaleció su capacidad de predecir y de dar cuenta de los fenómenos a partir de modelos matemáticos.



Carátulas del libro *La evolución de la física*, escrito por Albert Einstein y Leopold Infeld

La experiencia sugiere, con frecuencia la intuición confunde y, a veces, la razón corrige, pero será la experimentación la que, en último término, valide lo indemostrable.

No todo habría de ser la obtención de logros notables y la realización de grandes descubrimientos en el paraíso mecanicista. Objeciones teóricas de mucha seriedad y aparentes contradicciones en los modelos mecánicos generaban el rechazo de un sector muy influyente de la comunidad científica. Por una parte estaba la imposibilidad de dar cuenta, a partir de primeros principios, de la irreversibilidad de procesos como la vida y la muerte, cuya evidencia choca con el carácter reversible de los procesos fundamentales, constituidos por colisiones entre partículas o interacciones mediante fuerzas electromagnéticas, que gozan de una perfecta invariancia temporal, esto es, que las ecuaciones que describen su comportamiento no pierden su validez física si se invierte el sentido del tiempo. En consecuencia, al no estar incorporada en el marco teórico de la física, la dirección del tiempo parecía ser tan solo una ilusión.

¿Cómo dar cuenta de un universo cuyos procesos evolucionan de manera irreversible mediante leyes que son, por principio, reversibles? El problema planteado es equivalente al de encontrar una interpretación física de la entropía, el concepto acuñado por Rudolf Clausius para explicar la irreversibilidad de los procesos termodinámicos, como la transferencia espontánea de calor entre dos cuerpos que se ponen en contacto y que inicialmente se encuentran a diferente temperatura. Con un talante no menos serio que el de la anterior objeción, se planteaba el carácter dudoso de la construcción de modelos de fenómenos físicos utilizando corpúsculos que no se pueden ver. Los filósofos positivistas, y los físicos afectos a esta orientación, reclamaban que la física se hiciera exclusivamente con elementos tangibles, y denunciaban que cualquier otra opción convertiría a la física en una metafísica. Es importante anotar que si bien esta última posición se encuentra bastante desacreditada, abrumada por los numerosos logros de la teoría atomista, desde un punto de vista puramente filosófico muchos de estos reclamos mantienen su vigencia.

Contrario a las aspiraciones de Helmholtz, los avances de la física en la segunda mitad del siglo diecinueve mostraron la insuficiencia de los conceptos de fuerza y materia para dar cuenta de los fenómenos electromagnéticos desde una perspectiva mecanicista. La fenomenología del electromagnetismo demandaba una nueva conceptualización para ser incorporada en el marco de la física teórica. La teoría de los fluidos eléctricos y magnéticos, último intento reduccionista por dar cuenta de la electricidad y el magnetismo, se mostró tan ineficaz y engorrosa como en su momento lo había sido la teoría del flogisto y el calórico para dar cuenta de los fenómenos termodinámicos. La existencia de fuerzas perpendiculares a la línea de acción, tal como la que experimenta una corriente eléctrica en presencia de un imán, no podía ser explicada mediante los sencillos esquemas mecánicos que tan buenos resultados habían dado en el caso de la física de Newton. Luego de la elaboración de una teoría electromagnética integral, realizada por James Clerk Maxwell, el concepto de campo, prefigurado en los trabajos de Michael Faraday, emerge para ocupar el lugar más destacado en el panorama de la física, no obstante que el pensamiento de su autor estuviera enraizado en la concepción mecanicista, manifiesta en el modelo heurístico que utilizó para elaborar sus teorías. El campo electromagnético, primordial y notable resultado de la obra de Maxwell, permitió hacer más sencilla la descripción física del mundo al reunir en una sola teoría la electricidad, el magnetismo y la óptica. La perspicaz intuición de Faraday sobre la existencia de una relación entre la luz y el magnetismo concuerda con la predicción que hizo Maxwell, a partir de las ecuaciones de campo que llevan su nombre, de que las perturbaciones del campo electromagnético se propagan como ondas a trescientos mil kilómetros por segundo, velocidad que, no por coincidencia, es la velocidad de la luz. Con lo anterior no solo quedó resuelto el problema de la velocidad de propagación de la interacción electromagnética, superando

la inconveniente acción instantánea y a distancia que tantas dificultades había generado en la teoría de la gravitación universal, sino que la luz, así como los fenómenos que le son inherentes, dejó de ser una entidad física aparte y pasó a ser una manifestación del campo electromagnético. Un cuarto de siglo después de que Maxwell publicara su monumental aporte a la física y predijera la existencia de las ondas electromagnéticas, el alemán Heinrich Hertz verificaría experimentalmente las predicciones del británico y, de paso, descubriría el efecto fotoeléctrico, fenómeno que habría de aportar la clave para la comprensión de la interacción entre la materia y la radiación, a la vez que develaría el carácter corpuscular de la luz, reabriendo una vieja polémica que supuestamente había sido resuelta un siglo atrás.

Si en algún momento de la historia de la física se revela el carácter artificioso de la construcción de sus conceptos y teorías es, justamente, en el surgimiento de la teoría del campo donde esta condición se manifiesta con toda claridad. La interacción a distancia entre dos cuerpos, mediada por una fuerza que se propaga con velocidad infinita, es remplazada por la interacción del cuerpo con el campo en cada punto del espacio. La aparente violación de la tercera ley de Newton por los fenómenos electromagnéticos se resuelve adscribiéndole al campo la capacidad de transportar momento y almacenar energía, magnitudes que parecían ser exclusivas de los cuerpos materiales. Pero, a pesar de que los autores de *La evolución de la física* se congratulan por el extraordinario logro que significó la emergencia del concepto de campo, no se muestran del todo satisfechos con que sigan siendo necesarias dos entidades diferentes para describir los fenómenos físicos, puesto que su más grande aspiración era la completa unidad de las fuerzas, es decir, la reducción de todas las entidades fundamentales a un solo campo unificado. Los anhelos de unidad de la naturaleza de Parménides, recogidos por Kant y por los filósofos naturales que siguieron su orientación en los

siglos dieciocho y diecinueve, están presentes en el pensamiento de Einstein e Infeld, y, de alguna manera, siguen vigentes en el de los físicos teóricos que en la actualidad se esfuerzan por alcanzar una descripción unificada de los fenómenos naturales.

“Una nueva realidad fue creada”, nos dicen Einstein e Infeld al referirse a las condiciones en las que emergió el concepto de campo. Luego de ser concebido como un recurso heurístico con el fin de dar cuenta de los fenómenos electromagnéticos desde una perspectiva operacional, el campo alcanzó el máximo estatus dentro de los conceptos de la física, y su grado de “realidad” se encuentra a la par del de la materia. Pero no habría de ser fácil la aceptación de esta nueva forma de conceptualización de los fenómenos físicos, puesto que la tradición mecanicista seguiría pasando factura a la física teórica por un largo tiempo. Inicialmente fue el fantasma del éter, supuesto medio de propagación de las ondas electromagnéticas, el que intrigó a los físicos, quienes debieron afinar los análisis para predecir los sutiles efectos que el movimiento de la Tierra debería producir al desplazarse en el hipotético elemento. Luego vendría el problema de detectar dichos efectos con una precisión nunca antes alcanzada por la experimentación. Sin embargo, contrariando las expectativas, la renuencia de la naturaleza a exhibir pruebas del movimiento de la Tierra respecto al éter, y, de manera indirecta, de su existencia, condujo a la postulación de la teoría de la relatividad, que transformó lo que parecía ser una contradicción teórica y un fracaso experimental en el más notable logro de la física desde que Newton publicara los *Principia*. Como consecuencia directa de la nueva teoría resulta la equivalencia de la masa y la energía: dos conceptos que en la mecánica de Newton estaban perfectamente diferenciados emergen en el contexto relativista como aspectos complementarios de una entidad más general, poniendo de manifiesto una relación profunda entre el campo y la materia, que se aprecia con toda

claridad en la creación y aniquilación de materia y antimateria.

El triunfo del concepto de campo significó el final de la concepción mecanicista del mundo físico, junto con sus sencillos modelos de fuerzas y corpúsculos. La capacidad de la física de dar cuenta de los fenómenos y de predecir nuevas situaciones aumentó de manera notable, pero a la par que su horizonte fenomenológico se expandía, sus dificultades conceptuales se ponían de manifiesto, ligadas, en ocasiones, a la concepción mecanicista en la que fueron formados la mayoría de los físicos que construyeron las nuevas teorías, a veces a pesar de sí mismos, ante la exigencia de armonizar la evidencia experimental con la coherencia teórica. Los aspectos básicos de la interacción entre el campo y la materia, o, si se prefiere, entre la materia y la radiación, que se manifiestan en el efecto fotoeléctrico, conducen a plantear una aparente dicotomía entre el comportamiento corpuscular, tradicionalmente asociado a las partículas materiales, y el comportamiento ondulatorio, propio de los campos. Al parecer, también los cuerpos materiales pueden exhibir un comportamiento ondulatorio, y los campos un comportamiento corpuscular, situación imposible de asimilar desde una perspectiva mecanicista.

La contundencia de la evidencia experimental no deja dudas respecto a la inviabilidad del materialismo ingenuo, y nos enfrenta con la necesidad de construir una nueva imagen del mundo físico, en la que los roles de onda y partícula no se pueden asignar de manera unívoca a una sola de las manifestaciones de la materia y la energía. El sencillo mundo newtoniano de fuerzas y corpúsculos da paso al misterioso universo de los objetos cuánticos. ■

Guillermo Pineda (Colombia)

Profesor del Instituto de Física de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Antioquia. Director y libretista del programa radial *Historias de la ciencia*. Director de la revista de divulgación *Experimenta*.