





RAFAEL ALEMAÑ

# *Física*

## *Del átomo al universo*

*Una apasionante revisión del conocimiento actual  
de los grandes principios de la Física*



ALMUZARA

© RAFAEL ANDRÉS ALEMAÑ BERENGUER, 2014

© EDITORIAL ALMUZARA, S.L., 2014

Primera edición: octubre de 2014

Reservados todos los derechos. «No está permitida la reproducción total o parcial de este libro, ni su tratamiento informático, ni la transmisión de ninguna forma o por cualquier medio, ya sea mecánico, electrónico, por fotocopia, por registro u otros métodos, sin el permiso previo y por escrito de los titulares del *copyright*.»

Editorial Almuzara. Colección Divulgación científica  
Director editorial: ANTONIO CUESTA  
[www.editorialalmuzara.com](http://www.editorialalmuzara.com)  
[pedidos@editorialalmuzara.com](mailto:pedidos@editorialalmuzara.com) [info@editorialalmuzara.com](mailto:info@editorialalmuzara.com)

Imprime: GRÁFICAS LA PAZ

ISBN: 978-84-94155-26-0

Depósito Legal: CO-1742-2014

Hecho e impreso en España-*Made and printed in Spain*

«...El Señor Dios tomó al hombre y le puso en el jardín de Edén para que lo cultivase y lo guardase. El Señor Dios dio al hombre este mandato: ‘Puedes comer de todos los árboles del jardín; pero del árbol de la ciencia del bien y del mal no comerás, porque el día en que comas ciertamente morirás’.»

*Génesis 2, 15.*



<i>Introducción</i> .....	9
<b>PARTE I. GRANDES TEORÍAS FÍSICAS</b> .....	17
1. MOVIMIENTO Y RELATIVIDAD .....	19
Del mecanicismo de Newton a la Relatividad de Einstein.....	20
Espacio, tiempo y espacio-tiempo.....	26
Gravedad y espacio-tiempo curvo.....	34
2. LA TEORÍA CUÁNTICA.....	43
Funciones cuánticas de estado.....	45
Los componentes básicos de la materia .....	47
El teorema de Heisenberg .....	50
Fermiones y bosones .....	53
La paradoja EPR.....	55
El gato de Schroedinger y el problema de la medida .....	58
3. FÍSICA ESTADÍSTICA.....	63
Termodinámica y mecánica estadística.....	66
La hipótesis ergódica.....	69
Cerca del equilibrio .....	73
El origen de la entropía.....	76
Una posible alternativa.....	81
4. UN MUNDO NO LINEAL .....	91
Análisis lineal .....	93
Mecanicismo y predictibilidad.....	96
Atractores dinámicos.....	101
Las rutas del caos .....	106
Caos y fractalidad.....	109
Autoordenación no lineal.....	114
Determinismo y predictibilidad.....	118
<b>PARTE II. MÉTODOS DE LA FÍSICA</b> .....	121
5. LAS TEORÍAS DE CAMPOS .....	123
El movimiento de las ondas.....	127
Medios continuos .....	133
La teoría clásica de campos.....	137
Campos relativistas y cuánticos.....	143
6. SIMETRÍAS Y TEOREMAS DE CONSERVACIÓN .....	151
La energía y su conservación .....	154
Conservación de la carga eléctrica .....	158

El teorema de Noether .....	163
Simetrías abstractas .....	168
Ruptura de la paridad.....	170
Tensores, invariancia y covariancia .....	174
7. PRINCIPIOS VARIACIONALES.....	181
Ecuaciones del movimiento y cálculo de variaciones.....	187
Las ecuaciones de Lagrange y las de Hamilton.....	194
Teoría Cuántica y Relatividad .....	201
De ayer a hoy.....	205
8. TEORIAS GAUGE.....	209
El gauge en la física.....	212
Teorías gauge de unificación .....	222
PARTE III. CIENCIA Y CONOCIMIENTO .....	235
9. EXPLICACIÓN Y PREDICCIÓN .....	237
Buscando explicaciones.....	239
Clases de explicación científica .....	244
Predicciones, indeterminismo y causalidad .....	250
Causalidad y determinismo.....	253
Incertidumbre e impredecibilidad.....	260
Indeterminación .....	262
10. LAS LEYES DE LA NATURALEZA.....	265
Teoría y observación .....	267
Alcance y límites del convencionalismo .....	271
¿Son convenciones las leyes físicas?.....	277
Las relaciones entre teorías.....	280
La consistencia de las matemáticas.....	289
11. EL MODELO FÍSICO DEL MUNDO.....	299
Un mundo dinámico.....	304
El movimiento y la intuición física.....	307
Validez y evaluación de las teorías .....	310
Los perfiles del conocimiento empírico.....	317
12. FÍSICA Y REALIDAD .....	329
La naturaleza del mundo físico.....	334
Científicos filósofos .....	339
Percepciones, estructuras y cualidades sensibles .....	344
El anhelo de la teoría final .....	350
<i>Bibliografía</i> .....	361



## *Introducción*

El método científico reúne dos circunstancias singularmente paradójicas: por una parte es la actividad intelectual de más reciente aparición en la cultura humana —muy por detrás en su nacimiento del arte, la religión o la filosofía— y es a la vez la que más intensos y duraderos cambios ha introducido en ella. Las transformaciones de todo género que la ciencia ha provocado en nuestra civilización abarcan desde los espectaculares avances en la medicina y la industria, hasta el aumento de nuestro conocimiento puro sobre el universo y las leyes que en cualquier escala lo gobiernan. Ello sin contar con las más prosaicas pero también más cercanas comodidades domésticas con que la moderna tecnología abastece la vida cotidiana del ciudadano corriente en un país desarrollado.

Pero junto al poder para manipular nuestro entorno y satisfacer nuestras necesidades y deseos, la ciencia confiere al ser humano otro poder más noble por más desinteresado, que no es otro que el de incrementar su conocimiento sobre los fenómenos de la naturaleza. Esta facultad, que podríamos llamar el «poder de conocer», precede y subyace a la habilidad tecnológica, pues al fin es ésta la que se deriva de aquélla. Sin embargo, la marea siempre creciente de invenciones destinadas a satisfacer nuestros problemas prácticos y la urgencia con que tales asuntos solicitan nuestra atención en la vida diaria, tiende a oscurecer la preeminencia, en el sentido expuesto, del conocimiento puro.

«No hay ciencias aplicadas, sino aplicaciones de la ciencia», solía decir a este respecto Louis Pasteur. El pensamiento científico, en consecuencia, tiene por objeto primordial la consecución de conocimiento con independencia del uso que pos-

teriormente pueda serle dado. Tal propósito suele perseguirse tratando de explicar la mayor cantidad de hechos mediante el menor número de leyes posible, lo que no deja de crear una tensión esencial en el propio corazón del quehacer científico.

La disciplina que hasta el presente más se ha aproximado a semejante ideal es la física, a la cual de uno u otro modo han tomado como modelo el resto de las ramas que con el tiempo brotaron del tronco único de la ciencia. El grado de perfección formal alcanzado por la física en algunas parcelas es tal que en ellas puede ser considerada como un cuerpo de conocimiento puramente deductivo: se parte como premisas de un conjunto de leyes que se supone rigen las entidades existentes en la naturaleza, y a continuación se deducen las propiedades y comportamientos de dichas entidades mediante reglas de inferencia tomadas de la lógica y las matemáticas.

Ya en esta breve descripción de la estructura lógica de la física topamos con tres cuestiones problemáticas. La primera de ellas concierne al carácter puramente hipotético de las leyes adoptadas como premisas, pues sólo como conjeturas provisionales han de ser juzgadas en cualquier etapa de su desarrollo; la certeza absoluta es por completo ajena al ámbito del conocimiento científico. La segunda nos lleva a plantearnos el grado de fiabilidad que merece la existencia real de las entidades a las que se aplican, ya que muchas de ellas se aceptan como reales por el simple hecho de que parecen ser exigidas por las leyes que en un determinado momento gozan de nuestra confianza. En tercer lugar se halla la discusión sobre las garantías de aplicabilidad de las matemáticas —en rigor una creación abstracta del intelecto humano— al mundo natural, el cual, salvo para algunos lunáticos y ciertos filósofos, no es una producción de nuestras mentes.

El intento de dilucidar estos y otros muchos interrogantes análogos, se encuentra rodeado de grandes dificultades. Tanto así que casi trescientos años de debates filosóficos apenas si han arrojado alguna luz al respecto. Cada descubrimiento que parezca abrir nuevas perspectivas en nuestra concepción del universo, hace rebrotar con fuerza dudas sobre los fundamentos en que se asienta la física, lo que convierte en indispensable además de en apasionante una revisión continua de los mismos. El fin

declarado de esta obra, así por lo tanto, es poner al alcance del lector con interés por cuanto rodea al mundo de la ciencia, las herramientas básicas que le permitan lograr siquiera una visión panorámica de los vericuetos y entresijos por los que discurre el flujo de la investigación física.

Son muchas las maneras en que este empeño puede abordarse, de lo que se deduce que la aquí escogida no es la única posible ni tampoco tiene por qué ser la mejor. En lo que sigue adoptaremos una estrategia muy similar a la de quien supervisa un edificio examinando primero la distribución de las habitaciones y el mobiliario en ellas contenido, pasando después a considerar la estructura de las vigas y paredes maestras así como las técnicas utilizadas para ensamblarlas entre sí, y termina analizando el material de que se componen los cimientos junto con la textura del terreno sobre el que se sustentan. Cada paso nos lleva por un nivel de complejidad más profundo que el anterior, permitiéndonos formular preguntas que apuntan hacia la razón misma de la estructura y la fortaleza de los apoyos en que se sostiene.

De acuerdo con el plan esbozado, comenzaremos con una breve exposición de las teorías físicas más importantes alumbradas hasta el momento, puesto que sería vano lanzarnos a indagar sobre los fundamentos de una ciencia sin conocer aun someramente los contenidos de que se compone. Las discusiones sobre el movimiento y sus causas abren la marcha con una panorámica que recorre desde los trabajos de Newton hasta la Relatividad de Einstein y unas pinceladas de la cosmología de ella derivada. Históricamente la mecánica fue la primera porción del pensamiento físico en librarse de los lastres escolásticos medievales, configurándose con ello como ciencia moderna e independiente. Es también, quizás, la ciencia cuyos resultados más familiares nos resultan por quedar tan cercanos a lo que nuestros sentidos son capaces de percibir (desplazamientos, trayectorias, velocidades). Sin embargo, los descubrimientos realizados en los albores del siglo XX sobre la relatividad del espacio y del tiempo obligan a reconsiderar nuestras presuposiciones sobre tales conceptos y, consecuentemente, sobre casi todo el resto de la física.

Casi por las mismas fechas en que los conceptos de la Relatividad tomaban cuerpo, se gestaba otro de los grandes

revulsivos de la ciencia física en el siglo XX, la Física Cuántica. Mientras que las teorías de Einstein alcanzaron pronto una asombrosa notoriedad popular —hasta el punto de figurar desde entonces como un lugar común en la cinematografía y la literatura fantásticas— no ocurrió lo mismo con la teoría cuántica. El hecho de que a primera vista no concerniese a la naturaleza del espacio y del tiempo, la radical transformación que comportaba en nuestras concepciones de lo que la materia es, así como las numerosas confusiones en su interpretación creadas por los hábitos de pensamiento heredados de la física clásica, contribuyeron en gran medida al anonimato de una de las teorías más extrañas y exitosas de la historia.

La estadística juega un papel decisivo en el marco de la teoría cuántica, pero justo es reconocer que con anterioridad su importancia en la física no era en absoluto desdeñable. Desde mediados del siglo XIX se vino desarrollando un movimiento de científicos que aspiraban a explicar las propiedades de los sistemas macroscópicos (aquéllos con un tamaño suficiente para ser directamente perceptibles por los sentidos) mediante el comportamiento colectivo de sus numerosísimos componentes microscópicos. Sus pretensiones culminaron con el nacimiento de lo que hoy conocemos como Física Estadística. En ella se reconoce por primera vez que la función de los métodos estadísticos en la ciencia resulta del todo insustituible cuando entran en juego tan descomunal cantidad de elementos que se excede cualquier capacidad práctica de cálculo. Es entonces cuando la posibilidad de estudiar los comportamientos individuales desaparece y las estimaciones estadísticas se hacen inevitables.

La trascendencia de una concepción como ésta, en el marco de una física hasta ese momento segura de su poder para predecir el comportamiento individual de los componentes de cualquier sistema, sería ya de por sí suficientemente destacada para mencionarla. Pero su relevancia cobra tintes aún más dramáticos cuando advertimos —cosa que raramente se hace en los textos al uso— que la aplicación a los microcomponentes de un sistema, un gas por ejemplo, de las mismas leyes físicas que rigen sobre los objetos macroscópicos, no parece conducir necesariamente al comportamiento esperable del sistema como un todo

según lo que dicta la experiencia. El caso es especialmente grave en lo que respecta a la segunda ley de la termodinámica, cuyos resultados no se deducen obligatoriamente de un tratamiento estadístico de la misma. En otras palabras, la fundamentación rigurosa de parte de nuestras teorías macroscópicas sobre la base de la física estadística, continúa siendo terreno de debate e investigación.

El último tercio del siglo XX ha sido testigo de un acontecimiento que rara vez se tiene la suerte de vivir, esto es, el nacimiento de una nueva ciencia con las implicaciones epistemológicas que ello conlleva. La que aquí se menciona, la Dinámica No Lineal, no aparece por simple acumulación de complejidad en un área especializada de una ciencia preexistente, lo que aconseja su escisión como disciplina autónoma. Más bien ocurre que el estudio de sistemas físicos cuyas interacciones se describen mediante un tipo particular de ecuaciones, denominadas *no lineales*, invita a una perspectiva completamente distinta de la conducta y predictibilidad de los fenómenos físicos. Si bien la física estadística imponía una clara restricción en nuestra capacidad práctica de predicción a causa del inmenso número de partículas bajo estudio, la dinámica no lineal establece de principio una limitación de orden teórico al indicar situaciones en las que sólo una precisión infinita en los datos iniciales permite realizar predicciones futuras con un mínimo de fiabilidad. Es claro que en tales circunstancias no es ya la mera falta de recursos técnicos, sino que parecen ser las propias reglas de la naturaleza las que imponen cortapisas a nuestras aspiraciones de conocimiento.

Estos son los asuntos tratados en la parte I de la obra, mientras que la parte II se dedica a examinar los procedimientos y los principios teóricos generales por los que se han guiado los investigadores para elaborar las teorías previamente bosquejadas. La idea de «campo» en física es, sin asomo de duda, una de las más destacadas y fecundas jamás concebidas. El campo físico, cuyo ejemplo mejor conocido es el campo de fuerzas debido a la gravedad, constituye un compromiso entre la profunda convicción del intelecto humano sobre la imposibilidad de que los cuerpos se influyan a distancia sin conexión aparente entre ellos, y la evi-

dencia empírica de que a pesar de todo eso parece ser lo que ocurre. Se introduce entonces la noción de que existe «algo» no visible extendido ente los cuerpos que se influyen mutuamente, físicamente responsable de tal influencia. Lejos quedan ya los días en que se suponía que los campos de fuerzas y los de otras clases no eran más que cómodos apoyos para la imaginación del teórico. Bien al contrario, hoy se tiene la certeza de que los campos deben ser considerados en un sentido físico tan reales como nuestro sillón favorito, si es que no deseamos acarrear toda suerte de contradicciones e incoherencias en otras muchas ramas de la física.

De renunciar a la realidad física del campo, una de las herramientas que quedarían seriamente dañadas sería la de los principios de conservación. Gracias a ellos admitimos que en el curso de los procesos naturales nos es dado encontrar ciertas cantidades numéricas o ciertas relaciones abstractas entre ellas, que permanecen sin cambios. La presunción de que tales reglas de conservación existen se ha visto verificada tan repetida y ampliamente que nadie alberga la menor duda —salvo pruebas de extraordinaria solidez en contrario— de su vigencia universal.

Incidentalmente, el hecho de que contemos con leyes de conservación para los fenómenos físicos, permite elegir de entre todos los métodos matemáticos posibles aquéllos que garantizan dichas reglas de conservación. De este modo obtenemos nuevos formalismos con los que construir la estructura lógica de la física, explorando así nuevos puntos de vista y posibilidades quizá antes no contempladas.

Los llamados *principios variacionales* suponen una alternativa al antiguo formalismo newtoniano basado en la noción de «fuerza», cuyo uso se ha extendido con gran éxito a prácticamente todos los ámbitos de la física. No es de extrañar que así hay sucedido, ya que si consideramos la ciencia física como un sistema lógico en el que se deducen unas proposiciones a partir de otras, en general es posible elegir más de un conjunto de enunciados como premisas de los razonamientos posteriores. Tomar como punto de partida una determinada colección de hipótesis en lugar de otras, tan sólo dependerá en cada caso del gusto del investigador y de las simplificaciones que con ello se consigan.

La parte II concluye con un repaso de lo que las teorías *gauge* son y cuanto en un nivel de divulgación puede decirse de ellas. Los formalismos *gauge* constituyen lo más semejante al ideal cartesiano de la deducción pura que la ciencia ha logrado alcanzar. En ellas, partiendo de razonamientos puramente formales sobre principios de invariancia y conservación, es posible inferir la existencia de entidades, como campos y partículas, que realmente se encuentran en la naturaleza. Hasta qué punto el éxito de determinadas teorías *gauge* nos indica una cierta estructura en las leyes naturales o en nuestra percepción de las mismas, es todavía objeto de interesantes reflexiones.

La parte III, con la que se cierra la obra, es la de mayor cariz epistemológico por cuanto busca profundizar en cuatro asuntos de gran importancia para la fundamentación de la física. El primero de ellos gira en torno a la pregunta de qué se entiende por una explicación física de un cierto conjunto de fenómeno y en qué sentido la predicción de su acaecimiento puede ser considerada una explicación de los mismos. La eterna discusión acerca del papel de las matemáticas en la ciencia, proyecta aquí su alargada sombra tan desafiante como en todas las épocas. El segundo punto a tratar es consecuencia del primero: si se dan explicaciones y predicciones sobre los fenómenos, es porque ha de haber leyes a las que dichos fenómenos se hallen sujetos. Ahora bien, cuál es el carácter de dichas leyes, su pertenencia real al mundo de los hechos o al de nuestras invenciones especulativas, es algo que dista mucho de resultar claro.

En tercer lugar, y dando por sentado que la ciencia sí parece descubrir leyes, se abre la cuestión de qué características del mundo físico presuponen la vigencia y aplicabilidad de tales leyes. Por último, se discute la relación entre el conocimiento ofrecido por la física y el suministrado por los sentidos ordinarios, pues si bien los enunciados de aquélla sirven para matizar la información de éstos, no es menos cierto que la física es juzgada verdadera por su confirmación mediante una evidencia empírica de algún modo vinculada a nuestros sentidos. La pregunta que inquiera por qué el mundo descrito por la física teórica parece ser tan distinto del que nos sugieren nuestras percepciones, sirve de antesala para un punto final en el que se delibera

sobre el alcance y las limitaciones del género de conocimiento que la ciencia puede brindarnos.

Cualquier exposición de los fundamentos de una ciencia, y en especial en el caso de ciencias tan desarrolladas como la física, suele enfrentarse a objeciones referentes a su complejidad para el gran público y a la necesidad de su realización. Con respecto a la primera, creo que resulta de gran ayuda dejarse guiar por el comentario de Einstein según el cual *«las cosas han de mostrarse tan simples como sea posible, pero no más sencillas de lo que realmente son»*. Todo esfuerzo de divulgación de un asunto técnico tiene como límite el falseamiento de la realidad que toda simplificación excesiva conlleva de un modo u otro. No obstante, se ha tratado de reducir el aparato matemático al mínimo indispensable —y aun así en muchos casos las ecuaciones se han visto reducidas a meras curiosidades decorativas— en tanto que tampoco se ha profundizado en temas de gran complejidad y extensión, como la física de partículas y la cosmología, que merecerían por sí mismos un volumen completo.

En cuanto a la oportunidad o inoportunidad de su realización, éste es un riesgo que toda obra divulgativa sobre una disciplina en tan continuo y trepidante crecimiento debe correr. Los avances son hoy día tan frecuentes y rápidos que muchos resultados concretos utilizados en ciertas argumentaciones se hallan en trance de quedar anticuados aun antes de llegar a publicarse. Sin embargo, sigo persuadido de que merece siempre la pena embarcarse en la aventura de relatar en la manera más fiel posible los logros y fracasos, los desvelos y las satisfacciones que procura la interminable lucha de la humanidad por el conocimiento. Un conocimiento que, al fin y a la postre, es uno de los dones que como tal otorga el rango de humanos a los seres que lo cultivan.



PARTE I

# GRANDES TEORÍAS FÍSICAS

«La mejora de alguna máquina o proceso es de gran valor para el mundo, pero el descubrimiento de una ley de la naturaleza, aplicable en miles de casos y formando una permanente y siempre válida adición al conocimiento, es un avance mucho mayor.»

H.C. HOOVER (1874-1964)  
Presidente de los Estados Unidos



Fotografía de Albert Einstein aparecida en la obra *Relativity and gravitation* (1921), de J. Malcolm Bird, publicada por London Methuen.

## 1. MOVIMIENTO Y RELATIVIDAD

El año 1687 vio por fin la publicación del libro *Principios Matemáticos de la Filosofía Natural*, tras diez años de silenciosa dedicación por parte de su autor, el científico inglés Isaac Newton (1643-1727). La obra había sido escrita, entre otros motivos, con el fin de responder a una cuestión formulada por un amigo de Newton, el astrónomo real Edmundo Halley, acerca de la posibilidad de explicar la órbita elíptica de los planetas mediante una fuerza inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que los separa del Sol. Efectivamente, el sabio inglés no sólo consiguió responder afirmativamente a la pregunta de su amigo, sino que logró demostrar a un tiempo que el mismo género de fuerzas era el responsable de las órbitas de los satélites de Júpiter y Saturno, del giro de la Luna alrededor de la Tierra, de las mareas en los océanos terrestres y de fenómenos tan dispares como el movimiento de los cometas o la caída de objetos contra el suelo. En realidad la prueba dada por Newton resultaba mucho más general, pero en concreto aseguraba que todo cuerpo girando con suficiente velocidad en torno a un punto fijo que lo atrajese con una fuerza inversamente proporcional al cuadrado de la distancia, habría de moverse a su alrededor según una órbita elíptica de acuerdo con las leyes descubiertas años atrás por el astrónomo alemán Johannes Kepler (1571-1630).

El camino recorrido hasta alcanzar tales conclusiones no fue en modo alguno sencillo, pues para ello tuvo Newton que perfeccionar los conceptos sobre el movimiento introducidos en la física por Galileo, en dura pugna con las doctrinas medievales entonces imperantes, así como desarrollar las técnicas matemáticas que le permitiesen precisar sin ambigüedades sus teorías.

Con respecto a esto último, Newton se convirtió (junto con el filósofo y matemático alemán Leibniz) en uno de los fundadores del cálculo infinitesimal. La primera parte de este nuevo método se denomina cálculo diferencial y nos informa de cómo varía una función cuando los cambios en la variable de la que depende tienden a cero. Recordemos que una función es cualquier regla que asocia a una o más variables, llamadas «independientes», un valor único de otra variable, denominada «dependiente».

El límite del cociente entre el incremento de  $f(x)$  y el de  $x$  cuando éste se hace arbitrariamente pequeño, es lo que matemáticamente se denomina «derivada de la función», y se escribe  $df(x)/dx$ . Existen reglas sencillas para hallar las derivadas de las funciones ordinarias, asunto éste que no presenta mayores complicaciones. Del cálculo integral, empero, no es posible decir lo mismo ya que no hay reglas fijas válidas en todos los casos. La integración es la segunda parte del cálculo infinitesimal y representa la operación matemática contraria a la derivación. Si aplicando las reglas de la derivación a una cierta  $f(x)$  obteníamos su derivada, al aplicarle la técnica llamada «integral» obtenemos otra función de la cual  $f(x)$  es la derivada. Es claro, en todo caso, que la derivación y la integración actúan como operaciones matemáticas recíprocas; lo que una hace lo deshace la otra.

## DEL MECANICISMO DE NEWTON A LA RELATIVIDAD DE EINSTEIN

La utilidad en física de estas herramientas matemáticas se hace evidente sin más que examinar las tres leyes del movimiento de Newton. La primera de ellas, la «ley de la inercia», asegura que todo cuerpo no perturbado exteriormente permanecerá en estado de reposo o de movimiento rectilíneo y uniforme. Esa es la razón de que el movimiento rectilíneo y uniforme, también llamado *inercial*, no precise ulterior explicación para ser justificado, o por lo menos no la precise más que el estado de reposo. Este es un punto interesante puesto que la antigua doctrina aristotélica consideraba que el estado «natural» de los cuerpos era el reposo, de manera que para ponerlos en movimiento resul-

taba indispensable la intervención de una fuerza externa. Y ello era así cualquiera que fuese el movimiento del cuerpo en cuestión, inercial (rectilíneo y uniforme) o no inercial (con aceleraciones que alterasen su velocidad o su dirección). La primera ley de Newton viene a desmentir estas suposiciones, mientras que la segunda nos informa sobre los efectos de la fuerza que una porción de materia ejerce sobre otra.

La denominada «ley fundamental de la Dinámica» establece que la fuerza ejercida sobre un cuerpo es directamente proporcional a la variación de su cantidad de movimiento. Aquí Newton entiende por «cantidad de movimiento» el producto de la masa del cuerpo por su velocidad,  $mv$ , representado por la letra  $p$ , y por su variación la derivada con respecto al tiempo de  $p$ . Llamando  $F$  a la fuerza ejercida nos quedaría  $F = dp/dt$ , y si consideramos que la masa  $m$  es constante la fórmula anterior es susceptible de escribirse  $F = m(dv/dt)$ . Ahora bien, a su vez la velocidad  $v$  es la derivada de la posición  $x$  con respecto al tiempo, por lo que la derivada temporal de  $v$  es igual a la que se obtendría derivando dos veces  $x$  respecto a  $t$ . Finalmente llegamos a la conclusión de que  $F = m(d^2x/dt^2) = ma$ , donde se simboliza con la letra  $a$  de aceleración la derivada temporal segunda de la posición. En el caso de que deseemos conocer la trayectoria del móvil, bastará con integrar la expresión precedente para llegar hasta la ecuación de  $x$  en función de  $t$ .

La tercera y última ley newtoniana del movimiento —la «ley de acción y reacción»— afirma que la fuerza ejercida por un cuerpo sobre otro se ve correspondida por otra fuerza igual en dirección y magnitud, pero de sentido contrario, que el segundo cuerpo realiza sobre el primero. Por simplicidad se supone en todo lo dicho que los objetos materiales se pueden representar a todos los efectos físicos como puntos, dotados de masa pero sin extensión, que aplican entre ellos fuerzas según la línea recta que los une. La única fuerza conocida en su época a la que Newton podía atribuir la interacción entre partículas era la gravedad, cuya ley él mismo formuló declarando que la fuerza de atracción gravitatoria entre dos cuerpos guardaba una proporcionalidad directa con el producto de sus masas e inversa con el cuadrado de la distancia de separación. La ley de gravitación

universal se expresa matemáticamente como  $F = GmM/r^2$ , en la que  $G$  es la constante de la gravedad,  $M$  y  $m$  las masas en cuestión, y  $r$  la distancia que las separa.

Las ideas básicas que constituyen el modelo newtoniano del mundo son sencillas de enumerar, aunque muchas de ellas se concretaron con el paso de los años y es probable que no todas hubiesen sido compartidas por el propio Newton. El sustrato fundamental de la realidad física lo forman conjuntamente el «espacio absoluto», que se concibe como una multiplicidad tridimensional de puntos coincidente con las tres direcciones espaciales (alto, largo y ancho), y el «tiempo absoluto», entendido como una multiplicidad unidimensional susceptible de ser recorrida en un solo sentido desde el pasado hacia el futuro. Se admitía sin discusión que aun cuando nuestras reglas y relojes fuesen defectuosos o se encontrasen en diferentes circunstancias físicas, existía siempre un patrón universal y perfecto de tiempo y espacio que otorgaba sentido al concepto de longitudes y duraciones absolutas. La idealización de un sistema de referencia de estas características consistía en la intersección de tres ejes perpendiculares dotados de un reloj perfectamente uniforme, cuya posición era indiferente pues el tiempo absoluto era por definición el mismo en todos los puntos del espacio.

Los cuerpos físicos estaban representados por masas puntuales que ocupaban una posición determinada en cada instante del tiempo, ejerciéndose mutuamente fuerzas instantáneas a través del espacio vacío entre ellas. Estas fuerzas eran las gravitacionales, que sólo dependían de la posición, y el hecho de que fuesen instantáneas significaba que el cambio en la localización de una partícula afectaba a todas las demás en todos los lugares del universo sin que transcurriese intervalo de tiempo absoluto alguno entre ambos sucesos. El movimiento de las partículas materiales —que simbolizaban desde un guijarro hasta una estrella— se hallaban gobernados por las tres leyes de Newton, las cuales a su vez sólo resultaban válidas en aquellos sistemas de referencia que se encontrasen en reposo o en movimiento inercial respecto del espacio absoluto. En caso contrario en las ecuaciones newtonianas del movimiento aparecían términos dependientes de las aceleraciones del sistema de referencia, a los que

se denominaba «fuerzas de inercia» por indicar la discrepancia entre los sistemas de referencia inerciales y los que no lo eran.

Jamás desde la época de Newton se ha vuelto a poseer un modelo de la realidad tan simple y a la vez de tan vasto poder explicativo. La riqueza predictiva y la precisión de las teorías newtonianas demostraron ser tan avasalladoras que sus sucesores se entregaron con tesón a la tarea de ampliar y profundizar el campo de aplicación de las mismas. Por ello no es extraño que las evidencias en su contra, teóricas y experimentales, se abriesen paso en la mente de los estudiosos tras muchos esfuerzos y enconadas discusiones. Las investigaciones llevadas a cabo sobre la electricidad y el magnetismo por los científicos de los siglos XVIII y XIX, en especial los británicos Michael Faraday (1791-1867) y James Clerk Maxwell (1831-1879), expusieron a la luz efectos físicos que parecían desviarse de los supuestos newtonianos.

Se descubrió, por ejemplo, que las fuerzas magnéticas podían ser de atracción y de repulsión, que no actuaban a lo largo de líneas rectas sino en circunferencias, y que no sólo dependían de la distancia sino también de la velocidad de las cargas eléctricas que las producían. La demostración realizada por el alemán Heinrich Hertz (1857-1894) de que la luz es una onda electromagnética remató definitivamente las pretensiones de exclusividad del esquema newtoniano. Ahora resultaba indiscutible que aun cuando la gravedad quizás actuase instantáneamente a distancia —y comenzaba a dudarse de ello— lo cierto era que las fuerzas electromagnéticas no lo hacían así. La propagación de las ondas detectadas por Hertz de un punto del espacio a otro tardaba un tiempo muy reducido pero claramente distinto de cero. Era simplemente el fabuloso valor de la velocidad de la luz,  $c = 300.000 \text{ km/s}$ , el que hacía parecer tales interacciones como instantáneas.

Las dudas arrojadas subsiguientemente sobre las teorías de Newton, alcanzaron incluso al principio clásico de Relatividad. Por el hecho de que la ley de inercia garantizaba la igualdad mecánica entre sistemas de referencia inerciales, las ecuaciones newtonianas del movimiento permanecían invariables al pasar de uno de estos referenciales a otro. La cuestión se suscitaba entonces sobre la posibilidad de que este principio de relati-

dad perdiese su validez con las ecuaciones de Maxwell, responsables de describir un electromagnetismo que no se rendía frente a la mecánica clásica.

Las fórmulas clásicas que relacionaban las coordenadas entre distintos sistemas inerciales —las transformaciones de Galileo— no conservaban la forma de las ecuaciones de Maxwell, tal como sí hacían con las ecuaciones del movimiento de Newton. Sin embargo, y para asombro general, los experimentos probaron sin excepción que todos los fenómenos mecánicos y electromagnéticos se mostraban idénticos en cualquier sistema de referencia inercial. En el intento de explicar este sorprendente resultado se ensayaron diferentes vías de modificación de las leyes de Newton, de Maxwell, o de las transformaciones de Galileo, sin resultado alguno. El misterio se mantuvo hasta que la genial perspicacia de un joven físico alemán, Albert Einstein (1879-1955), dio en hallar la clave del enigma, estatuyendo con ello la teoría Especial de la Relatividad<sup>[1]</sup>.

La solución se encontraba en renunciar a los conceptos newtonianos de espacio y tiempo «absolutos», sustituyéndolos por una diversidad de asignaciones de posición y tiempo correspondientes a cada uno de los sistemas de referencia inerciales físicamente posibles, y todos igualmente legítimos. El criterio para determinar qué referenciales eran físicamente admisibles nos lo brinda el postulado según el cual la velocidad de la luz es la misma en todos los sistemas inerciales y constituye un límite inalcanzable para ellos. Distintos observadores situados sobre referenciales en movimiento inercial unos respecto a otros, asignarán posiciones y tiempos dispares a los mismos acontecimientos, sin que sea lícito afirmar que las coordenadas asignadas por alguno de los observadores es más «verdadera» que las demás.

Este hecho, no obstante, no debe confundirse con la errónea creencia de que la teoría de Einstein permite el viaje al pasado o la contemplación del curso de los acontecimientos invertidos en el tiempo. El lanzamiento de una flecha y su posterior impacto en la diana mantendrán ese orden de acaecimiento en todos los sistemas inerciales físicamente aceptables, es decir, con veloci-

---

1 A. Einstein, *Sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento*, *Annalen der Physik*, nº 17, 891 (1905)



dades inferiores a la de la luz. Cosa distinta es que dos sucesos sin conexión causal entre ellos puedan ser vistos en un orden temporal inverso desde diferentes referenciales en movimiento relativo. La rotura de un plato en la Tierra y el impacto de un meteorito en Plutón son hechos que tienen lugar en puntos tan alejados entre sí, que en ocasiones un rayo de luz que partiese de uno de ellos no lograría alcanzar al otro antes de que se produjese. Y puesto que ninguna influencia física puede viajar más deprisa que la luz, en esos casos no es posible la existencia de conexión causal alguna entre ambos (ninguno puede ser la causa del otro), de forma que resulta indiferente el orden en que sean vistos en uno u otro sistema de referencia.

Dado que la Relatividad especial niega un significado absoluto al espacio, al tiempo, al movimiento y al reposo, es de esperar que las fórmulas que relacionen las coordenadas de los posibles referenciales inerciales difieran notablemente de las de Galileo en la mecánica de Newton. De hecho así es, y las que ahora resultan correctas son las llamadas transformaciones de Lorentz, o de Einstein-Lorentz, a consecuencia de las cuales las medidas de las longitudes son distintas para observadores en movimiento o en reposo respecto del objeto cuya longitud tratan de determinar. Concretamente, las longitudes son menores para un observador en movimiento respecto del objeto en cuestión (contracción de Lorentz), y dicho efecto se hace más acusado cuanto más se acerca la velocidad relativa a la de la luz.

Asimismo encontramos que el tiempo varía a la inversa que las longitudes. La duración de un intervalo de tiempo, por ejemplo el periodo de un péndulo, es mayor para un observador en movimiento que para otro en reposo junto al péndulo, efecto denominado «dilatación temporal». El tiempo medido por un reloj en reposo en un determinado sistema de referencia es llamado «tiempo propio» de ese sistema y, por supuesto, es distinto en cada referencial en movimiento relativo.

## ESPACIO, TIEMPO Y ESPACIO-TIEMPO

Pese a que la Relatividad se debe en exclusiva al genio de Einstein, fue Hermann Minkowski (1864-1909) el primero en percatarse de que existía una formulación geométrica de las ecuaciones de Einstein que revelaba mucho de su más íntimo significado. En síntesis, lo que impulsó al matemático germano-ruso fue la sustitución del espacio tridimensional y el tiempo unidimensional newtonianos por una variedad matemática de cuatro dimensiones cuyas peculiares propiedades geométricas expresaban el contenido físico profundo de la teoría. Por analogía con los manejos de la geometría ordinaria no es difícil comprender lo esencial en la idea de Minkowski. Para ello tomamos el producto del tiempo  $t$  por la velocidad de la luz  $c$ , como una coordenada adicional junto a las tres coordenadas espaciales  $x, y, z$ . Todos sabemos que las coordenadas de un punto son diferentes en distintos sistemas de referencia (porque de lo contrario no existiría sino un único referencial), y se denotan por diferentes símbolos:  $x, y, z; x', y', z';$  etc...

Pero como ahora no contamos con un tiempo absoluto a nuestra disposición, la coordenada  $t$  variará en general de un observador a otro. Así tendremos grupos de cuatro coordenadas distintas para cada referencial:  $ct, x, y, z; ct', x', y', z';$  etc. A cualquiera de estos cuartetos de coordenadas se le denomina «suceso», y sus componentes, por cuanto que muestran una íntima relación entre el tiempo y el espacio, son llamadas «coordenadas espacio-temporales». El concepto físico que tales coordenadas nos definen, un universo en el que las coordenadas espaciales y temporales se someten a las mismas reglas de transformación relativistas, recibe el nombre de *espacio-tiempo*. Por ello este formalismo es llamado «geometría espacio-temporal», ya que ahora contamos con cuatro dimensiones, en vez de tres, a tener en cuenta en nuestros cálculos.

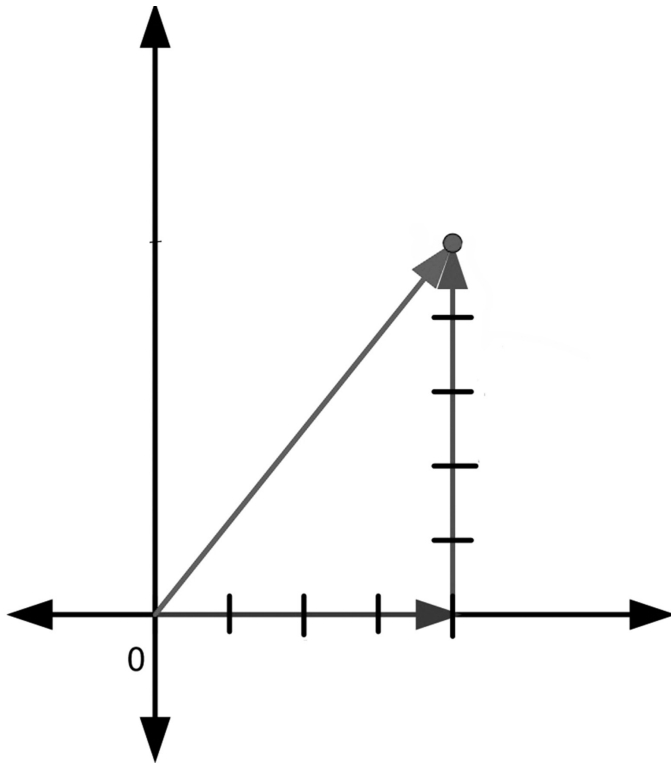
Como a dos sucesos cualesquiera (siguiendo el ejemplo precedente el lanzamiento de una flecha y su impacto en la diana) puede asignárseles dos grupos de coordenadas, uno para la partida de la flecha ( $ct, x, y, z$ ) y otro para su llegada al blanco ( $ct', x', y', z'$ ), estas dos series de coordenadas tomarán valores distin-

tos para cada observador. Sin embargo, la resta de los cuadrados de las diferencias de las coordenadas proporciona una cantidad invariable e independiente del sistema de referencia en el que se hayan tomado, entendiéndose que no podemos sumar o restar entre sí coordenadas de distintos observadores. Esta cantidad invariante se denomina «intervalo» y su expresión es:

$$s^2 = (ct' - ct)^2 - (x' - x)^2 - (y' - y)^2 - (z' - z)^2$$

A quienes conozcan el cálculo vectorial, esta expresión les resultará familiar por ser muy semejante a la del tamaño o «módulo» de un vector, excepto por el hecho de que aquí al primer término se le restan los otros tres. Los vectores son magnitudes matemáticas que poseen módulo y dirección, razón por la cual se suelen representar gráficamente por una flecha cuya longitud indica el valor del módulo y cuya orientación es representativa de su dirección. En un espacio con tres dimensiones el vector cuenta con tres componentes (trivector); en un espacio de cuatro dimensiones sus componentes son cuatro (tetravector), y así sucesivamente. El intervalo relativista entre dos sucesos es, pues, el tetravector que une ambos puntos espacio-temporales. Alguien habituado a trabajar con vectores pronto comprenderá que tal y como un vector posee el mismo módulo aunque tenga sus coordenadas expresadas en distintos sistemas de referencia, el tetravector del intervalo poseerá el mismo valor aun cuando las coordenadas que lo definan varíen de un referencial a otro.

También podemos recurrir a la metáfora de la linterna y el paraguas. Imaginemos que se sitúa un bastón o un paraguas cerrado ante una linterna encendida, de manera que la sombra del paraguas se proyecta a medias sobre la pared y sobre el suelo de la habitación. Si enfocamos la linterna desde diferentes ángulos, obtendremos diferentes formas en la sombra del paraguas aun cuando éste permanezca inmóvil. O incluso si dejamos fija la linterna y movemos el paraguas inclinándolo, la porción de la sombra sobre la paredes será mayor cuanto más vertical se coloque el paraguas frente a la lámpara. En cambio, cuanto más horizontalmente lo inclinemos más se alargará su sombra en el suelo, acortándose en la misma medida en la pared. La analo-



Un vector en sus ejes de coordenadas.

gía se aclara si consideramos el paraguas como el tetravector del intervalo, las distintas proyecciones de las sombras serían los distintos grupos de coordenadas en que nos es dado descomponerlo, y los desplazamientos del paraguas o de la lámpara representarían a los diferentes observadores en movimiento relativo.

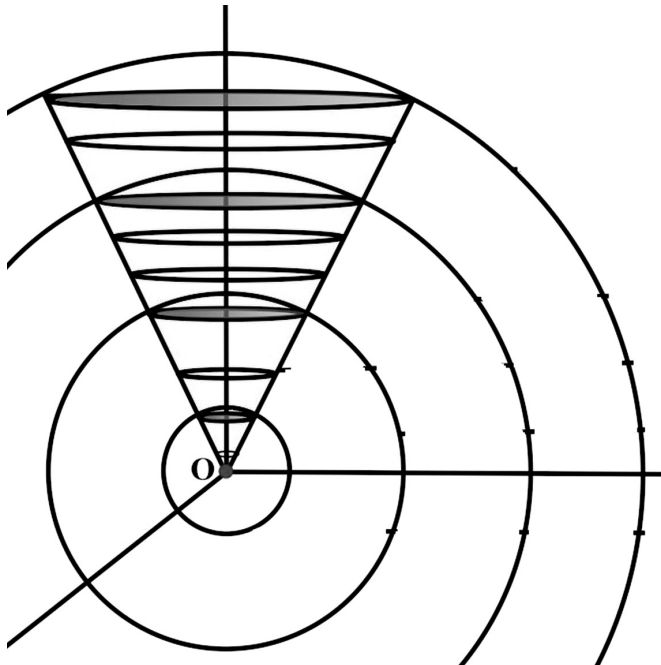
Se acostumbra a hablar comúnmente —y aquí se ha hecho así también— de las medidas de espacio y tiempo realizadas por tal o cual observador en movimiento relativo, originando en ocasiones la falsa impresión de que la Relatividad es una teoría de las mediciones realizadas por observadores muy veloces, o bien una parte de la física de los materiales especializada en tratar el comportamiento de reglas y relojes en condiciones extremas de velocidad. Ambas concepciones están radicalmente en desacuerdo con el genuino espíritu de la teoría einsteniana, cuyo

propósito es explicar el comportamiento de los fenómenos físicos en relación con las propiedades del espacio-tiempo en que se hallan inmersos. Las prescripciones de la Relatividad atañen directamente a la misma estructura del espacio y del tiempo, por lo que son independientes de los instrumentos de medición utilizados (reglas, relojes u otros más sofisticados) y de la presencia o ausencia de observadores en los sistemas de referencia de que se trate. Estas aclaraciones se olvidan con frecuencia por el afán de presentar la teoría del modo más intuitivo posible, lo que conduce a menudo a describirla en términos demasiado tangibles induciendo con ello al lector a pensar que involucran a nuestros instrumentos de medida más bien que a los sucesos físicos en sí mismos. Las transformaciones de Lorentz, por ejemplo, no tratan de las mediciones de observadores en movimiento relativo, sino de las proyecciones de los tetravectores espacio-temporales en los diferentes sistemas de referencia, sean o no medidas por esos hipotéticos observadores. Estas proyecciones serían las que las fórmulas nos aseguran que son aunque no hubiese observador alguno para medirlas en ese referencial concreto, del mismo modo que los días y los años transcurrían normalmente incluso antes de la invención del calendario.

De acuerdo con la línea que trata de introducir la teoría de la Relatividad mediante nociones tan intuitivas como sea posible, se acostumbra a explicar que el intervalo entre dos sucesos se halla relacionado con el tiempo propio de un observador cuyo movimiento le permita estar sucesivamente presente en ambos puntos espacio-temporales. Si  $d\tau$  es el tiempo medido por dicho observador (o tiempo propio del referencial en el que este observador se encuentra en reposo), el intervalo  $ds$  es igual al producto de  $d\tau$  por la velocidad de la luz  $c$ ,  $ds = cd\tau$ . Un observador que se moviese con la misma velocidad de la flecha lanzada hacia la diana, juzgaría posible encontrarse presente primero en su lanzamiento y después en su impacto, de modo que multiplicando por  $c$  el tiempo medido por su reloj obtendríamos el valor del intervalo entre tales sucesos. Si efectuamos la resta de los cuadrados de las diferencias de las coordenadas espacio-temporales —según la igualdad expuesta más arriba— y el resultado es positivo, esto supondrá que el cuadrado de  $cd\tau$  también lo es.

El significado de este hecho es que resulta físicamente admisible la existencia de un referencial cuya velocidad, siempre menor que  $c$ , le permita estar presente en ambos puntos. Cuando  $cdt$  es igual a cero entre cierto par de sucesos, lo que ocurre es que para desplazarnos desde uno al otro habríamos de viajar a la velocidad de la luz, cosa que sabemos no es factible. Y de acaecer que el cálculo de  $(ds)^2$  arrojase un resultado negativo, lo que implicaría correlativamente que  $(cdt)^2 < 0$ , concluiríamos que sería precisa una velocidad mayor que la de la luz para alcanzar ambos sucesos, posibilidad aún más inasequible que la precedente.

La aplicación física más útil del concepto de suceso se evidencia cuando nos percatamos de que los hechos no existen aislados sino concatenados unos con otros. Si una bola de billar, digamos, permanece quieta, no se moverá en el espacio pero sí lo hará en el tiempo. Dibujando por ello un hipotético esquema en el que estuviesen representados el espacio y el tiempo, la bola



El cono de luz como representación de una onda esférica de luz expandiéndose en el espacio-tiempo.

mostraría un valor constante de sus coordenadas espaciales y un valor creciente de su coordenada temporal. Ya que no es posible disponer de un gráfico con tres ejes espaciales y uno temporal, suele optarse por simbolizar nuestro mundo tridimensional mediante el plano formado por dos ejes mutuamente perpendiculares (se suprime el tercer eje espacial para facilitar la representación). Un tercer eje, perpendicular a los dos espaciales, representará el tiempo.

Así, la quietud de la bola sobre la mesa quedaría expresada por una línea recta paralela al eje temporal: no hay cambio en la posición espacial, pero dado que el tiempo pasa, sí lo hay en la coordenada temporal. Esta línea se llama «línea de universo», de la bola o del objeto que se quiera, y se construye disponiendo cada suceso (punto espacio-temporal) a continuación del que le precede, de forma que obtenemos una línea más o menos recta según el tipo de movimiento del objeto, y más o menos inclinada conforme a la velocidad del mismo. La longitud de esta línea (o de sus tramos rectos) se calcula mediante la fórmula del intervalo ya mencionada.

Tal ecuación del intervalo, como ya se ha repetido, simboliza directamente una suerte de «distancia» entre dos puntos del espacio-tiempo. Los matemáticos suelen dar el nombre de «métrica» a la definición de la distancia entre dos puntos cualesquiera de un conjunto ordenado de ellos al que llaman «variedad». Es evidente que trasladando estas ideas al caso que nos ocupa, el intervalo de Minkowski es la métrica de la variedad tetradimensional que representa el espacio-tiempo físico. La principal diferencia entre esta geometría y la del espacio ordinario, además del número de dimensiones, estriba en que la correspondiente al espacio-tiempo *no* es euclídea; esto es, la definición de distancia entre dos puntos dada por el teorema de Pitágoras en la geometría ordinaria, no coincide con la proporcionada por el intervalo minkowskiano. En la geometría euclidiana usual dicha distancia se calcula sumando los cuadrados de las diferencias entre las coordenadas de dos puntos, mientras que en la de Minkowski los tres últimos términos (relacionados con las coordenadas espaciales) se restan al primero (relacionado con la coordenada temporal).

Análogamente, si el paso de un sistema a otro podía representarse en la geometría de Euclides como una rotación rígida de los ejes en la que éstos permanecían perpendiculares entre sí, como el giro de las aspas de un molino, el cambio de sistema de referencia será distinto en la nueva geometría espacio-temporal. La relación entre dos observadores en movimiento relativo se manifiesta como la rotación de los ejes espacio-temporales de uno respecto de los del otro: la relatividad del movimiento uniforme se manifiesta en el hecho de que cualquiera de los dos puede afirmar idénticamente que son los ejes del otro los que han girado respecto a los suyos. Sin embargo, la forma de tal rotación de ejes ya no es tan sencilla como en la geometría de Euclides, pues ahora resulta más apropiado considerar que los ejes del observador supuesto en reposo permanecen mutuamente perpendiculares, mientras los de aquél que juzgamos en movimiento se aproximan entre sí como las hojas de unas tijeras que se cierran.

La concepción geométrica del espacio-tiempo estatuye un vínculo antes desconocido entre los conceptos de energía, masa e impulso. En el marco de la Relatividad estas tres nociones pasan a ser simplemente las distintas proyecciones en los ejes de espacio y tiempo de un único vector tetradimensional. El módulo de este vector, análogamente al del intervalo, se calcula mediante la fórmula  $(E_0)^2 = (E)^2 - (cp_x)^2 - (cp_y)^2 - (cp_z)^2$ .  $E_0$  representa el módulo del vector energía-impulso (su «energía propia»), que en los casos de las partículas con velocidades inferiores a la de la luz, coincide con la que mediría un observador en reposo con respecto a la partícula («energía en reposo»);  $E$  es la energía relativa de la partícula en un referencial dado, y los restantes términos son las componentes del impulso en dicho sistema de referencia. Una consecuencia de todo ello es que la energía resulta ser por completo equivalente a la masa de la partícula en cuestión, a través de la conocida igualdad de Einstein  $E = mc^2$ .

Algunos autores de gran relevancia han declarado públicamente que identificar los conceptos de masa y energía es un error<sup>[2]</sup>, puesto que en las partículas que se mueven a la velocidad de la luz —como las de la propia luz, los fotones— carece de sentido la noción de «masa en reposo», por cuanto no hay refe-

---

2 Mario Bunge, *Filosofía de la Física*, Ariel, 1982.



rencial físico real en el que se encuentren en reposo. Añaden que la ecuación precedente se refiere a la energía y el impulso de la mecánica de las partículas relativistas mientras que el fotón pertenece a la teoría electromagnética, de donde es equívoco asignarle a toda energía una masa y un impulso  $p \equiv mv$ .

El error de tales argumentos radica en confundir las ideas de masa o energía «en reposo» con las de masa o energía «propia». Toda partícula, cualquiera que sea su velocidad, posee un vector de energía-impulso cuyo módulo presenta un valor definido unívocamente (nulo en el caso concreto de las partículas con velocidad  $c$ ). Esto es suficiente para que le sea conferido un valor inequívoco de masa (o energía) propia. Cuestión muy otra es que en algunos casos concretos exista la posibilidad de girar los ejes de un cierto referencial de modo que el eje del tiempo coincida con ese vector, situación en la que tendríamos un referencial en el que dicha partícula está en reposo, equiparándose así los conceptos de masa-energía en reposo y masa-energía propia. Esto sencillamente no es posible en lo concerniente al fotón y otras partículas con la velocidad de la luz.

Asimismo es cierto que la fórmula del vector energía-impulso pertenece a la mecánica de partículas, pero no lo es que resulte inaplicable por principio en el electromagnetismo u otras teorías similares. Del hecho de que una determinada ecuación sea válida en un cierto dominio teórico no se sigue que no lo sea en en algún otro también. Einstein, por cierto, derivó su primera demostración sobre la identidad entre la masa y la energía a partir del análisis de la energía de un electrón sometido a fuerzas eléctricas externas, ya en su primer artículo sobre Relatividad de 1905. En el siguiente trabajo donde ampliaba estas consideraciones, también de 1905, utilizaba las ecuaciones del electromagnetismo para probar que un cuerpo que emitiese energía en forma de luz perdería una cantidad equivalente de masa.

Acaso lo más intrigante de esta visión del mundo físico sea su radical modificación de nuestra manera de concebir las relaciones entre el espacio y el tiempo. Con anterioridad a la teoría de Einstein, se aceptaba como evidencia indudable que los objetos se movían en el espacio al paso de un tiempo que fluía como la corriente de un río. Hoy sabemos que esto es un error. De

acuerdo con el enfoque relativista, no existe movimiento de los objetos en el tiempo, puesto que el tiempo se encuentra representado ya como un eje más en el gráfico espacio-temporal. Son más bien las líneas de universo las que se hallan extendidas en el espacio-tiempo, en lugar de ser los cuerpos los que se desplazan en un presunto flujo espacio-temporal al igual que una barca a la deriva sigue la corriente del río. En un sentido riguroso el cosmos constaría tan sólo de espacio-tiempo surcado por miríadas de líneas de universo, en tanto que la sensación humana de transcurso del tiempo tendría un origen puramente psicológico.

Resulta difícil admitir, tan habituados como estamos a nuestros modos ordinarios de pensar, que las cosas no ocurren en el espacio y en el tiempo, sino que simplemente «son» en el espacio-tiempo. Por esta razón no pocas obras divulgativas han popularizado una imagen del problema tan atractiva como falsa. Se identifica al observador con una lucecita que va ascendiendo por la línea de universo a medida que éste va tomando conciencia de los sucesivos instantes de su existencia. La analogía fracasa nada más advertimos que comporta necesariamente un «movimiento» de la lucecita. Y para definir ese movimiento necesitaríamos un tiempo exterior, debido a que el espacio-tiempo ya incluye un eje temporal que participa en la construcción de la línea de universo. Esto nos lleva a la conclusión ineludible de que palabras como «ahora», pasado», futuro» y otras del mismo jaez, son tan solo etiquetas, a veces engañosas, para demarcar los intervalos temporales desde el punto de vista del hablante.

## GRAVEDAD Y ESPACIO-TIEMPO CURVO

A continuación de la Relatividad Especial, Einstein se propuso desarrollar una teoría que diese cuenta también de los movimientos acelerados. En particular buscaba alguna que justificase de modo relativista la aceleración de mayor importancia a escala macroscópica, esto es, la gravitación. Un modelo simplificado pero muy conocido y bastante gráfico de la gravitación relativista, lo constituye una lámina de caucho sobre la que se colocan bolas de billar o cualquier otra clase de objetos representando

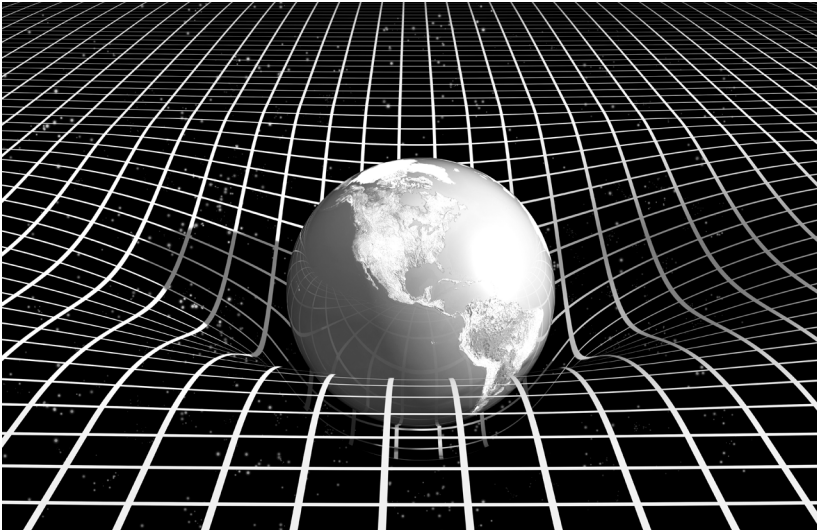
las masas. La lámina elástica juega el papel del espacio (para representar el espacio-tiempo completo habríamos de añadir por lo menos una dimensión más y se perdería toda impresión de movimiento) y cada bola produce una deformación en la lámina que resulta mayor cuanto mayor sea su masa. Una masa de la magnitud del Sol —en sentido figurado— produciría en la lámina un profundo pozo en forma de embudo, mientras que una masa como la de la Tierra produciría un pozo considerablemente menor. A cierta altura sobre el hoyo generado por el Sol, la Tierra gira creando a su vez su propio pozo gravitacional en el que gira la Luna.

La gravedad no es ya una fuerza que actúa a distancia, sino la curvatura que produce en el espacio-tiempo la presencia de materia (curvatura del *espacio-tiempo* y no sólo del espacio, como cabría pensar erróneamente a partir del ejemplo de la lámina elástica). Gravedad y geometría espacio-temporal confluyen en la Relatividad General —la teoría relativista que se ocupa de los movimientos acelerados causados por la gravitación— a fin de explicar efectos como la desviación de los rayos de luz al pasar cerca de grandes masas siguiendo las geodésicas del espacio-tiempo en presencia de la gravedad. Recordemos que las geodésicas son las líneas más cortas en una superficie cualquiera y que, como ahora el espacio-tiempo se ha deformado al curvarse, la distancia más corta no será en general una línea recta como las que estamos acostumbrados a imaginar.

La reacción natural ante todo lo expuesto es la de preguntarse: ¿pero cómo puede curvarse el vacío, es decir, la nada? La respuesta a esta pregunta pasa por aclarar una interpretación errada del concepto de «curvatura» y de lo que es natural en geometría. Los seres humanos estamos acostumbrados a pensar sobre la curvatura en términos de superficies o de objetos que se doblan y se presentan torcidos ante nuestros ojos. Tenemos la sensación, inevitable por el hábito, de que la curvatura de algo es una propiedad que debe ser percibida desde el exterior, siendo ahí justamente donde anida el origen de nuestro error. Los geógrafos que determinaron la curvatura de la Tierra muchos años atrás, lo hicieron obviamente sin salir de ella, aunque tal posibilidad es hoy perfectamente razonable gracias a los viajes espacia-

les. Tan solo precisaron entonces de medidas geodésicas íntegramente realizadas en la misma superficie de nuestro planeta sobre líneas idealmente rectas. Del hecho de que tales rectas tendían a aproximarse hasta cortarse conforme se prolongaban, se dedujo correctamente que la superficie sobre la que se habían trazado — la de nuestro planeta— estaba curvada como la de un esferoide.

Del mismo modo nos es dado proceder en el caso del espacio-tiempo, llevando a cabo medidas sobre él a fin de determinar su grado de curvatura sin dejar de permanecer en su seno. Podría objetarse contra esto que si de nuestras medidas se infiere que el espacio-tiempo es curvo, ello se debería a que lo que hemos medido no son auténticas líneas rectas. Mas, ¿qué es una auténtica línea «recta»? La única definición razonable parece ser la que toma como patrón de rectitud la línea de nuestra visión. Pero precisamente la línea de la visión es la definida por la propagación de la luz en el espacio vacío, y sabemos que la luz se curva bajo la influencia de intensas fuerzas gravitacionales. Si se piensa detenidamente se llega a la ineludible conclusión de que las trayectorias de la luz en el vacío, sean éstas como sean, han de ser consideradas las distancias más cortas físicamente posibles entre dos puntos.



La gravedad como curvatura creada por las masas en el espacio-tiempo.

A partir de tal definición de distancia, o «métrica», matemáticamente formalizada, cabe desarrollar con toda pureza lógica la entera geometría del espacio-tiempo tetradimensional con curvatura variable. Por eso mismo la métrica no será ya minkowskiana, sino de un tipo particular que contempla la curvatura espacio-temporal, variable en cada punto según haya o no en él materia y gravitación, cuya denominación es «pseudorriemanniana». La fórmula que nos proporciona la métrica pseudorriemanniana (o lo que es lo mismo, el valor del intervalo entre dos puntos en un espacio-tiempo curvo) es  $ds = \sqrt{g_{ik} dx_i dx_k}$ , sobreentendiéndose la suma sobre todos los valores de los subíndices  $i$ ,  $k$ , desde el 1 hasta 4.

El conjunto de los coeficientes  $g_{ik}$  cambia su valor al pasar de un sistema de referencia a otro de acuerdo con unas leyes precisas de transformación, motivo por el cual reciben el nombre matemático de *tensor*. Con mayor precisión, las  $g_{ik}$  forman lo que se llama un tensor métrico, puesto que contienen toda la información necesaria para establecer la distancia entre dos puntos cualesquiera en el espacio-tiempo. Como es de suponer, el cálculo del intervalo entre dos sucesos no será ahora tan sencillo cual era con la métrica de Minkowski. Dado que el tensor métrico, en general, cambiará de valor en cada punto, el modo correcto de proceder es integrar sobre  $ds$  entre los dos sucesos considerados. Hablando sin mucho rigor, esto es equivalente a dividir el intervalo que deseamos calcular en fragmentos tan pequeños que en ellos podamos considerar las  $g_{ik}$  constantes sin grandes errores, y sumarlos todos a continuación.

Einstein no sólo descubrió la nueva formulación de la métrica espacio-temporal curva, sino que también halló las ecuaciones que relacionan el valor de las componentes del tensor métrico, las  $g_{ik}$ , con la densidad de energía e impulso presentes en una determinada región del espacio-tiempo. Para ello partió del tensor de Riemann,  $R_{\mu\nu\sigma\lambda}$  (utilizamos aquí subíndices griegos sin que ello tenga importancia particular), que determina la curvatura global de un espacio  $n$ -dimensional. Como la curvatura espacio-temporal de una región dada puede diferir de la adyacente a causa de sus distintos contenidos de materia y energía, Einstein redujo dicho tensor a una forma más interesante para

él,  $R_{\mu\nu}$  o tensor de Ricci, de modo que indicase tan sólo la curvatura local en un cierto entorno. Considerando que  $T_{\mu\nu}$  es el tensor que expresa el contenido de materia y energía en una región del espacio-tiempo,  $R$  es una cantidad escalar asociada al tensor de Ricci y  $\kappa$  es una constante de la que forman parte la constante gravitatoria  $G$  y la velocidad de la luz, las ecuaciones gravitacionales de Einstein son  $R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R g_{\mu\nu} = \kappa T_{\mu\nu}$ . Ocasionalmente esta igualdad se abrevia simbolizando el primer miembro como  $G_{\mu\nu}$ , al que se denomina tensor de Einstein, con lo que queda  $G_{\mu\nu} = \kappa T_{\mu\nu}$ .

La Relatividad General predecía que en ciertas condiciones las masas aceleradas emitirían ondas gravitatorias de modo análogo a como las cargas eléctricas emiten ondas electromagnéticas al acelerarse. Y aunque hasta la fecha tales ondas han escapado a la detección directa, se tiene evidencia fehaciente de su existencia gracias a la observación de la forma en que ha variado a lo largo de los años el periodo de rotación del sistema estelar doble PSR 1913+16. Las variaciones observadas sólo pueden ser explicadas convincentemente admitiendo que el sistema pierde energía al emitir las ondas gravitatorias pronosticadas por la teoría de Einstein.

Tras ser aplicadas con éxito a los problemas astronómicos en la escala del sistema solar, pronto las ecuaciones de la Relatividad General hubieron de enfrentarse a los desafíos del cosmos en su conjunto. Se comprobó que existían dos tipos de curvatura: una debida a las concentraciones locales de materia, semejante a los valles y montañas de la superficie terrestre, y otro achacable a la curvatura global del universo, al igual que la que nos permite considerar nuestro planeta como una esfera.

Desafortunadamente se desconoce el valor de la densidad de masa del universo, un dato de crucial importancia en la determinación de la curvatura global del mismo. En caso de que la densidad superase un cierto valor umbral la curvatura del cosmos sería globalmente positiva, a consecuencia de lo cual las líneas de universo de dos móviles que se desplazasen perfectamente paralelos entre sí acabarían cruzándose (pensemos en lo que sucede sobre la superficie esférica terrestre, donde los «paralelos» geográficos intersectan todos en los polos). De darse una densidad

inferior a ese valor crítico la curvatura cósmica sería negativa y las propiedades métricas del universo resultarían análogas a las de la superficie de una silla de montar a caballo: dos líneas de universo como las anteriores se alejarían al prolongarse. Por último, si la densidad fuese exactamente igual al valor crítico mencionado, la curvatura resultaría nula y las líneas paralelas permanecerían siempre equidistantes, sin acercarse ni alejarse.

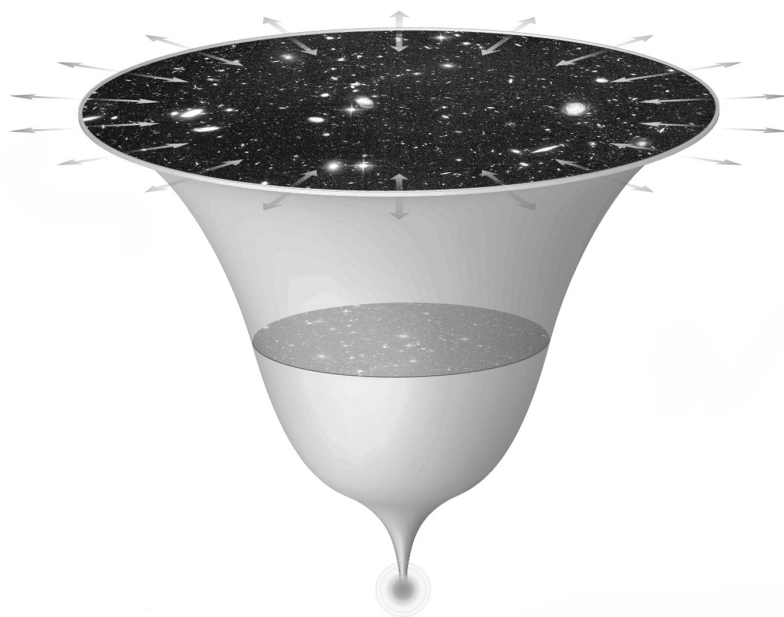
Cuando la densidad de materia en un lugar sobrepasa un cierto valor crítico, la curvatura espacio-temporal puede tender a infinito, en lo que se llama una «singularidad». Este fenómeno no es directamente perceptible desde el exterior ya que se crea en su entorno una zona en la que la gravitación es tan intensa que ni siquiera la luz puede escapar de ella. Tenemos entonces lo que los teóricos denominan con un término que incluso ha logrado gran difusión popular: un «agujero negro». Parece existir uno de estos exóticos objetos cosmológicos en la constelación del Cisne (Cygnus X-1 es el más firme candidato), pero éste es todavía asunto sujeto a controversia. A comienzos de la década de 1980 el astrofísico R.D. Blandford<sup>[3]</sup> adoptó el original procedimiento de considerar la superficie del agujero negro como una especie de «membrana» bidimensional, dotada de conductividad eléctrica, viscosidad, tensión superficial y otras propiedades.

Con anterioridad a esas fechas los trabajos del británico Stephen Hawking alumbraron la posibilidad de que los agujeros negros no fuesen realmente «negros», esto es, incapaces de emitir cualquier clase de energía hacia su entorno. Hawking llegó a la conclusión de que, merced a la relación  $E = mc^2$  de Einstein, la intensa energía asociada a la gravedad en la superficie de estos objetos astronómicos, podría dar lugar a la creación de pares partícula-antipartícula (parejas de partículas elementales diferenciadas por el signo de su carga eléctrica). Una de ellas caería en el agujero negro perdiéndose para siempre, y la otra sería expulsada al exterior en lo que se denominó «radiación Hawking». Este descubrimiento abría la puerta a la excitante posibilidad de que, en periodos de tiempo inimaginablemente dilatados, los agujeros negros se evaporaran y desapareciesen.

---

3 S. Hawking y W. Israel compiladores, *Three hundred years of gravitation*, Cam. Univ. Press (G.B.), 1987.

Gran parte del interés acerca de los agujeros negros radica en la suposición de que los primeros instantes del universo vieron el estallido del cosmos a partir de un estado muy similar al de una singularidad. Esa Gran Explosión, o *big bang*, no sólo supuso la aparición de toda la materia que compone el universo, sino asimismo la propia creación del espacio y del tiempo, que no deben suponerse preexistentes a tal acontecimiento. Tras algunos titubeos iniciales no tardó en establecerse que en el marco de la cosmología relativista cabía la posibilidad de un universo en expansión, esto es, en el cual los cúmulos de galaxias se alejasen continuamente entre sí, extremo éste brillantemente confirmado en el primer tercio del siglo XX por las observaciones del astrónomo norteamericano Edwin Hubble (1889-1953). Tampoco esta afirmación debe entenderse como la separación de grupos de galaxias en el seno de un espacio ajeno a su movimiento. En realidad, lo que tiene lugar guarda un más estrecho parecido con la separación de los puntos de un globo moteado cuando éste se infla. No se trata de que las galaxias se desplacen en un espacio indiferente; más bien es que el propio espacio



La expansión del universo a partir de la Gran Explosión.



entre ellas se expande sin cesar. También persisten hasta la fecha numerosas dudas acerca del ritmo de tal expansión y el género de condiciones cosmológicas que sobre ella podrían influir.

La investigación del *big bang* es una encrucijada en la que se encuentran cosmólogos y físicos de partículas, pues se admite que en las circunstancias extremas del origen del universo, las cuatro fuerzas fundamentales de la naturaleza hoy conocidas — el electromagnetismo, la gravedad, la nuclear fuerte y la nuclear débil— se hallaban unificadas en una única fuerza gobernante de todos los procesos físicos. Hasta el fin de sus días Einstein persiguió la consecución de una teoría que, siguiendo la estela de la Relatividad General, explicase unificadamente el resto de las fuerzas naturales en términos geométricos. No lo logró, pero hoy pocos físicos dudan de que algún día se conseguirá algo semejante, pese a que para ello el concepto de «geometría» habrá de alterarse mucho más profundamente de lo que se ha modificado desde los tiempos de Euclides.

