

LA GRAN ILUSIÓN III. LAS ONDAS GRAVITACIONALES

Autor: JORGE FLORES VALDÉS

- [COMITÉ DE SELECCIÓN](#)
- [EDICIONES](#)
- [DEDICATORIA](#)
- [AGRADECIMIENTOS](#)
- [PREFACIO](#)



© Fondo de Cultura Económica
Primera edición, 1988
Tercera reimpresión, 1995
Segunda edición, 1997
ISBN 968-16-5236-3
Impreso en México

- [NOTA INTRODUCTORIA](#)
- [I. EL EXPERIMENTO DE WEBER](#)
- [II. ALBERT EINSTEIN, CREADOR DE LA RELATIVIDAD](#)
- [III. NOTAS SOBRE EL ORIGEN DE LA TEORÍA GENERAL DE LA RELATIVIDAD](#)
- [IV. LAS IDEAS DE LOS GRIEGOS](#)
- [V. UN LIBRO QUE CONMOVIÓ AL MUNDO](#)
- [VI. SOBRE LOS HOMBROS DE GIGANTES](#)
- [VII. LOS PROCESOS DE GALILEO](#)
- [VIII. UN CUENTO DE LA CIUDAD ETERNA: LAS ABEJAS Y EL CINCEL](#)
- [IX. DOS MAESTROS DE LOS EXPERIMENTOS PENSADOS](#)
- [X. LAS LEYES DE NEWTON](#)
- [XI. EVOLUCIÓN DE LA MECÁNICA](#)
- [XII. UN APARATO SIMPLE PERO ÚTIL](#)
- [XIII. LUZ, ELECTROMAGNETISMO Y RELATIVIDAD](#)
- [XIV. LAS GEOMETRÍAS NO-EUCLIDIANAS](#)
- [XV. MÉTRICA Y CURVATURA](#)

- [XVI. EL PRINCIPIO DE EQUIVALENCIA](#)
- [XVII. LA MASA GRAVITATORIA ES INERCIAL](#)
- [XVIII. EL CORRIMIENTO HACIA EL ROJO](#)
- [XIX. LA TEORÍA GENERAL DE LA RELATIVIDAD](#)
- [XX. LAS PRIMERAS PRUEBAS](#)
- [XXI. ALBERT EINSTEIN, FÍSICO FAMOSO](#)
- [XXII. ¡POR FIN, LAS ONDAS GRAVITACIONALES!](#)
- [XXIII. LOS NUEVOS EXPERIMENTOS](#)
- [XXIV. EPÍLOGO](#)
- [IMÁGENES DE ALBERTO EINSTEIN](#)
- [COLOFÓN](#)
- [CONTRAPORTADA](#)



COMITÉ DE SELECCIÓN

Dr. Antonio Alonso

Dr. Gerardo Cabañas

Dr. Juan Ramón de la Fuente

Dr. Jorge Flores Valdés

Dr. Leopoldo García-Colín Scherer

Dr. Tomás Garza

Dr. Gonzalo Halffter

Dr. Raúl Herrera

Dr. Jaime Martuscelli

Dr. Héctor Nava Jaimes

Dr. Manuel Peimbert

Dr. Juan José Rivaud

Dr. Julio Rubio Oca

Dr. José Sarukhán

Dr. Guillermo Soberón

Coordinadora:

María del Carmen Farías



la

ciencia/41

para todos

Primera edición (La ciencia desde México),1988

Tercera reimpresión,1995

Segunda edición (La ciencia para Todos),1997

La ciencia para Todos es proyecto y propiedad del Fondo de Cultura Económica, al que pertenecen también sus derechos. Se publica con los auspicios de la Secretaría de Educación Pública y del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.

D.R. © 1988 FONDO DE CULTURA ECONOMICA, S. A. DE C. V.

D.R. © 1997 FONDO DE CULTURA ECONOMICA

Carretera Picacho-Ajusco 227, 14200 México, D.F.

ISBN 968-16-5236-3

Impreso en México



DEDICATORIA

A Ernesto



AGRADECIMIENTOS

Quisiera aprovechar esta oportunidad para agradecer los comentarios de Luis Estrada, José Luis Mateos y Jesús Robles Domínguez, que contribuyeron a mejorar mi manuscrito original; a Claudio Firmani la información sobre la supernova 1987a, y a la revista Naturaleza la autorización para reproducir mi artículo "Imágenes de Alberto Einstein".

Deseo reconocer la ayuda de Fanny Arenas y Miguel Navarro Saad en la preparación tipográfica de este libro. Doy también las gracias a Margarita Pimienta, que tanto me ha ayudado para llevar a cabo este y otros trabajos.

Y vaya un reconocimiento especial a mi hijo Pico, quien escribió el Capítulo VIII.



PREFACIO

En la historia reciente de la física, y con toda seguridad en muchas otras ramas y tiempos de la ciencia, hallamos ejemplos de objetos elusivos, que no se dejan ver. Se tiene, por un lado, una teoría física bien establecida como la mecánica cuántica, digamos, que predice una serie de hechos que habrían de ser observables. Si estos hechos se descubrieran experimentalmente, la teoría, ya comprobada en otras situaciones, recibiría una confirmación más y conquistaría otra isla firme del conocimiento, plataforma segura para dar luego un paso más hacia adelante. Por el contrario, el no poder verificar esas predicciones podría dar al traste con el esquema teórico, o al menos retrasar su progreso.

Vienen a la mente tres revolucionarias predicciones, hechas en el primer tercio del siglo XX: las de la teoría general de la relatividad de Einstein, las antipartículas de Dirac y el neutrino de Pauli. Las dos primeras recibieron pronta comprobación: entre 1916, cuando Einstein predijo que la luz debería desviarse al pasar cerca de un objeto muy masivo, y 1919, cuando Eddington observó tal desviación en un eclipse de Sol, mediaron tan sólo tres años; y el positrón, antipartícula del electrón predicha por Dirac en 1930, fue descubierto por Anderson en 1932, solamente dos años después. Sin embargo el neutrino, casi sin masa, que según Pauli debería acompañar a la desintegración beta para salvar así un postulado tan fundamental como el de que la energía se conservara, resultó más elusivo; entre 1931, cuando Pauli lo propuso, y su descubrimiento por Reines, transcurrieron cerca de 25 años. No obstante, la gran ilusión se convirtió en realidad en estas tres historias.

Esa gran ilusión no se ha tornado realidad en otros casos, predicciones que también han estado bien arraigadas en sus respectivas teorías físicas. Así, las ondas gravitacionales predichas por Einstein no han sido encontradas; los cuarks, que Gell-Mann imaginó en 1963 como los constituyentes del protón, han también rehuido a sus descubridores; los núcleos superpesados, mucho más que el uranio, tampoco se han dejado ver, el monopolio magnético, imaginado por primera vez en 1932 por Dirac, se nos ha escondido y la fusión nuclear fría no se ha logrado. Empero, en ciertos momentos del desarrollo histórico de las teorías físicas de este siglo, se creyó (o aún se cree) firmemente en la existencia de estos objetos y fenómenos elusivos. Descubrirlos, por tanto, sería un gran honor para el experimentador que lo lograra.

No ha de extrañarnos, pues, que en diversas ocasiones grupos experimentales muy serios y en general de buena reputación hayan echado las campanas al vuelo al anunciar que, por fin, la gran ilusión se confirmaba. Se han "descubierto" las ondas gravitacionales, el cuark, los núcleos superpesados, la fusión fría y, al menos dos veces, el monopolio magnético. En todas las situaciones ocurrió lo mismo: un gran revuelo inicial al darse a conocer el descubrimiento sensacional; una rápida respuesta por parte de otros grupos experimentales, colegas y antagonistas del supuesto descubridor, que como jaurías se lanzaron a demostrar que el hallazgo había sido en falso; y el epílogo: todo se debía a una falla experimental, que si a una mala calibración del aparato, que si a una confusión en los materiales observados, que si nuestro aparato es más sensible...

Hemos ya relatado en dos trabajos anteriores (*El monopolio magnético y Los cuarks*, Colección La Ciencia desde México, Fondo de Cultura Económica, México, 1986 y 1987) la historia, plena de ideas brillantes y experimentos precisos, del elusivo polo magnético y de los cuarks siempre ocultos en su escondrijo. En lo que sigue narraremos la historia de otra gran ilusión de la física actual, las ondas gravitacionales, predichas por la teoría general de la relatividad, la obra maestra de Albert Einstein. En el último trabajo de esta serie nos ocuparemos de la fusión fría. Todo ello nos da ocasión de contar la fantástica historia de la física moderna, con sus avatares, sus logros y algunas de sus grandes ilusiones.

Indice



NOTA INTRODUCTORIA

En la naturaleza existen unas cuantas fuerzas fundamentales. La más débil de todas es la atracción gravitacional, aunque paradójicamente sea la más conspicua. El hombre, desde temprana edad, aprende a burlar ese jalón hacia la Tierra que lo hace caer. La satisfacción del niño y la sonrisa de sus padres cuando lo ven caminar por primera vez constituyen siempre un gran acontecimiento en la vida del pequeño. Desde sus primeros años, también, el niño observa el cielo, de noche y de día. Contempla el Sol, la Luna y las estrellas. Pocos entre los humanos, sin embargo, se dan cuenta de la íntima relación que hay entre la caída de los cuerpos en la superficie terrestre y el movimiento de los astros y planetas en el cielo.

Fue el gran matemático, astrónomo y físico inglés Isaac Newton quien primero arrojó luz sobre este asunto. En la granja de su madre, donde se había refugiado de la plaga que asolaba a Londres en 1665, al ver caer una manzana tuvo un chispazo de genio: ambos fenómenos —la caída de los cuerpos y el movimiento de los planetas— podrían tener la misma causa. De ahí surge la ley de la gravitación universal y el famoso libro III de los *Principia Matemática*, que Newton tituló "El sistema del mundo". Este libro es el primer tratado, a la manera de la ciencia actual, sobre el movimiento de planetas y de lunas, de cometas y de estrellas.

El siguiente gran salto hacia adelante en nuestra imagen de la gravitación lo dio el eminente físico Albert Einstein, nacido en Alemania en 1879. A los veintiséis años de edad, Einstein regala a la ciencia tres o cuatro ideas fundamentales, entre ellas la teoría de la relatividad. Más tarde, luego de diez largos años de trabajo, logra generalizar su teoría para incluir en ella a la gravitación. Este nuevo marco conceptual, hoy conocido como teoría general de la relatividad, es sin duda la obra maestra de Einstein. En ella se plantea una concepción de la gravitación que es radicalmente distinta a la visión clásica propuesta por Newton dos siglos antes. Según Einstein, la presencia de masas altera la estructura geométrica del espacio, curvándolo. En consecuencia, todo ente material —incluida la luz— sentiría esa curvatura del espacio y su trayectoria no sería rectilínea al pasar cerca de un cuerpo masivo. Tan revolucionaria predicción de la nueva teoría de la gravitación fue confirmada en 1919, cuando una expedición científica, bajo las órdenes del astrónomo inglés Arthur Eddington, observó durante un eclipse total de Sol la desviación de la luz al pasar cerca de éste. Con ello Einstein se convirtió en un científico de fama inusitada.

Algunas otras consecuencias de la teoría general de la relatividad han sido comprobadas por observaciones astronómicas y terrestres. Sin embargo, las ondas gravitacionales, también predichas por Einstein, no han sido establecidas más allá de toda duda: las ondas gravitacionales son todavía hoy una gran ilusión.

El relato que ahora iniciamos es la historia de la gravitación y sus ondas.



I. EL EXPERIMENTO DE WEBER

TÓMENSE dos grandes cilindros de aluminio, ajústense a sus superficies varios cristales piezoeléctricos para registrar pequeñísimas vibraciones, después colóquese un cilindro a mil kilómetros de distancia del otro y, con enorme paciencia, espérese a que los dos detectores se exciten al mismo tiempo. Este fue el experimento que realizó Joseph Weber, físico de la Universidad de Maryland, durante muchos meses entre 1958 y 1969. Por fin, el 30 de diciembre de 1968 los dos cilindros, uno en Maryland y el otro localizado en el Laboratorio Nacional de Argonne, no muy lejos de Chicago, oscilaron en forma simultánea. Muchas otras observaciones en coincidencia encontró Weber entre ese día y el 21 de marzo de 1969. Según él, la respuesta simultánea de sus dos cilindros no podría ser accidental: estábamos, por primera vez, ante los efectos de una onda gravitacional.

Más de diez años de trabajo emplearon los físicos de Maryland para construir y refinar su antena gravitacional. El cilindro, que pesa alrededor de 1 400 kilogramos, se cuelga de filtros acústicos por medio de un alambre y se introduce en una cámara al vacío. Para convertir en señales eléctricas las oscilaciones mecánicas de la superficie del cilindro se le ajustaron cristales piezoeléctricos. Con ello, Weber y su equipo de investigadores eran capaces de detectar desplazamientos del orden de 10^{-16} cm en las tapas del cilindro. Como esta distancia es más de mil millones de veces menor que la longitud de onda de la luz, los métodos ópticos para detectar esos minúsculos desplazamientos no podrían haber sido utilizados.

Para atreverse a publicar sus primeros resultados en el número de las *Physical Review Letters* correspondiente al 16 de junio de 1969, Weber llevó a cabo análisis teóricos y experimentales muy cuidadosos. Eliminó efectos sísmicos al usar, como ya dijimos, filtros acústicos; descartó, experimentalmente, la influencia de los relámpagos y otras fluctuaciones electromagnéticas, como las de la línea de voltaje, por ejemplo; Weber también consideró el efecto de los rayos cósmicos sobre sus detectores y mostró que este tipo de radiación no puede excitarlos. Finalmente, con dos detectores separados por más de 1 000 kilómetros trató de eliminar toda causa local. Por otro lado, consideró teóricamente la probabilidad de que los dos detectores, unidos por línea telefónica, respondieran al mismo tiempo. Así vio, por ejemplo, que la primera de las coincidencias que observó tenía una probabilidad de ocurrir una vez cada 18 años y es, por tanto, bajísima.

Las ondas gravitacionales se hacían notar en el detector de Weber como pulsos breves y aislados, que ocurrían dos veces al día. La explicación que el grupo de Maryland dio de estas observaciones es de por sí interesante y abría la puerta para otros experimentos que permitieran corroborar su descubrimiento. Según publicaron en 1970, los pulsos correspondían al momento en que se orientaba la antena gravitacional hacia el centro galáctico. Ahí, dada la gran concentración de masa y los violentos movimientos que ocurren, es razonable esperar que se generen la mayor cantidad de ondas gravitacionales lo suficientemente intensas para que las podamos detectar. Que el periodo fuera de 12 y no de 24 horas se explicaba porque a las frecuencias analizadas la Tierra no reacciona a la presencia de las ondas gravitacionales y entonces no las absorbe. La antena responde por tanto dos veces: cuando apunta directamente al centro de la galaxia y cuando lo hace a través de la Tierra.

Inmediatamente se sugirió que unas ondas gravitacionales tan intensas como las que posiblemente se estaban observando deberían estar asociadas a ondas electromagnéticas, que serían tal vez muy débiles debido a la fuerte absorción en el medio interestelar. Radioastrónomos de cinco observatorios británicos entre ellos el de Harwell y el de Jodreil Bank, buscaron afanosamente estas ondas asociadas de radio, con resultados negativos. La gran ilusión no se tornó en realidad, aunque la esperanza persiste y nuevas evidencias hay, como luego veremos.

Indice



II. ALBERT EINSTEIN, CREADOR DE LA RELATIVIDAD

¿POR qué Weber y tantos otros físicos en muchas partes del mundo buscan las ondas gravitacionales con tanto afán? Sin duda, la causa de esa búsqueda, que a veces se torna muy intensa, reside en la fama del gran Albert Einstein, quien predijo con ayuda de su teoría general de la relatividad la existencia de las ondas gravitacionales. Estas ondas, a semejanza de las electromagnéticas, se moverían con la velocidad de la luz y se producirían si algún objeto muy masivo sufriera alguna aceleración brusca.

Einstein nació el 14 de marzo de 1879 en la ciudad alemana de Ulm, cerca del Danubio. Su familia, de origen judío aunque alejada de la tradición religiosa, emigró un año después a Munich, donde permanecería quince años para luego establecerse en Milán. El joven Alberto realizó entonces el famoso *viaggio in Italia* y el país del arte le dejó maravillado: lo recorrió a pie, de Milán a Padua, de Padua a Florencia. Cuando se decidió que estudiara en Zurich, al no haber obtenido un diploma de bachiller en Suiza o en Alemania, debió presentar los exámenes de admisión para ingresar a la Escuela Politécnica. Aunque aprobó brillantemente el examen en física y matemáticas, sus conocimientos de las lenguas clásicas no fueron suficientes. Debió entonces pasar un año en la escuela propedéutica de Arau, para finalmente ingresar a la Politécnica de Zurich. Ahí, su curiosidad científica se vuelve insaciable y se maravilla con Galileo, Newton, Maxwell y Boltzmann. Las autoridades de la Escuela Politécnica no cumplieron la promesa que le habían hecho y Einstein no consigue el puesto de ayudante de profesor. Debió entonces ir a trabajar a la oficina de patentes de Berna. En aquella época se casa con Mileva Maric, antigua condiscípula. Con ella procrea dos hijos, Alberto y Eduardo.

En Berna elabora lentamente su revolución científica. En 1905 culmina sus trabajos y en el curso de un año presenta a los *Annalen der Physik*, la principal revista alemana de física en esa época, tres trabajos fundamentales: en uno explica el movimiento browniano, en otro el efecto fotoeléctrico, y en un tercero inventa la teoría especial de la relatividad. Con estos trabajos Einstein brinca al mundo oficial de la física. Von Laue, científico alemán muy famoso, va expresamente de Berlín a Berna para conocer a Einstein, y el ilustre Lorentz lo invita a Leiden para que exponga su trabajo. Poco más tarde, el gran físico alemán se incorpora a la vida académica; trabaja en la Universidad de Zurich y un año después va a enseñar a la de Praga. En 1911 nace el Congreso Internacional de Física Solvay. Financiado por un rico industrial belga, Ernest Solvay, rey de la sosa cáustica, en este congreso se reunieron los físicos más destacados del momento; entre ellos estaba ya Albert Einstein.

El inventor de la relatividad deja luego Praga y regresa a Zurich, ahora como profesor de la Politécnica que años antes había retrasado su inscripción como alumno. Apenas llegado allí, el káiser Guillermo II, emperador de Alemania, envía a Nernst y a Planck —dos de los principales físicos alemanes de la época— para ofrecerle una cátedra en Berlín y ser miembro de la Academia de Ciencias de Prusia. Se separa de su esposa Mileva y contrae matrimonio con Elsa, quien habría de ser su compañera en el periodo más glorioso y terrible de su vida.

Apenas había llegado Albert Einstein a Berlín, cuando estalla la primera Guerra Mundial. Él, pacifista por instinto, se opone al militarismo alemán y sólo su ciudadanía suiza lo libra de ser considerado traidor. A pesar de las acciones de guerra y de sus preocupaciones pacifistas, Einstein continuó trabajando. Hacia 1916 anuncia los principios fundamentales de su teoría de la gravitación, la teoría general de la relatividad, cuyas predicciones habrían de ser corroboradas durante el eclipse solar de 1919. Para comprobar esta teoría se construye en Berlín la Torre Einstein, sede de un Instituto de Astrofísica.

Abandonamos aquí el relato de los primeros cuarenta años de vida del gran físico, para dejar que él nos cuente, en sus propias palabras, la génesis de su teoría de la gravitación.

Indice



III. NOTAS SOBRE EL ORIGEN DE LA TEORÍA GENERAL DE LA RELATIVIDAD

EN UN pequeño libro, publicado originalmente en alemán en 1934 con el título *Mein Weltbild* —en español, tal vez, "El mundo como lo veo"—, el propio Einstein escribe una nota para arrojar un poco de luz sobre el camino que siguió su pensamiento hasta formular una nueva teoría de la gravitación. (En los párrafos que siguen, el lector poco experto habrá de tener paciencia pues encontrará muchos términos que no entiende. Sin embargo, vale la pena echarle una ojeada al relato de Einstein que se gozará más, si se regresa a él luego de completar la lectura del libro.) He aquí lo que Einstein nos dice:

Cuando, a través de la teoría especial de la relatividad, había llegado a la equivalencia de todos los así llamados sistemas de referencia inerciales para formular las leyes de la naturaleza (1905), surgió de manera natural la cuestión de si no habría una equivalencia ulterior entre todos los sistemas de referencia. Por decirlo de otra forma: si sólo se puede asociar al concepto de velocidad un significado relativo, ¿deberíamos perseverar en seguir tratando a la aceleración como un concepto absoluto?

Desde un punto de vista puramente cinemático no había ya duda respecto a la relatividad de todos los movimientos; sin embargo, físicamente hablando, los sistemas inerciales parecían ocupar un lugar privilegiado, que hacía que el uso de sistemas de coordenadas con movimiento arbitrario pareciera artificial.

Yo estaba, desde luego, consciente del punto de vista expresado por Mach, de acuerdo al cual parecería concebible suponer que la inercia se resiste no a la aceleración como tal sino a la aceleración respecto a las masas de otros cuerpos existentes en el mundo. Había algo de fascinante para mí en esta idea, aunque no me proveía de una buena base para elaborar una nueva teoría.

Di primero un paso hacia la solución del problema cuando intenté describir la ley de la gravitación en el marco de la teoría especial de la relatividad. Al igual que la mayoría de los escritores de esa época, traté de formular una *teoría del campo* para la gravitación, ya que no era posible, al menos de manera natural, introducir directamente la acción a distancia, debido a que la noción de simultaneidad absoluta había sido abolida.

El camino más simple era, por supuesto, retener el potencial escalar de Laplace y completar la ecuación de Poisson de una manera obvia, de tal forma que se satisficiera la teoría especial de la relatividad. La ley de movimiento de un puntomasa en un campo gravitacional tendría también que adaptarse a la teoría especial de la relatividad. El camino aquí no dejaba de ser errático, pues la masa inercial de un cuerpo podría depender del potencial gravitacional. De hecho, cabría esperar que así fuera debido al principio de la inercia de la energía.

Estas investigaciones, sin embargo, llevaron a resultados que me generaron fuertes sospechas. De acuerdo a la mecánica clásica, la aceleración vertical de un cuerpo en el campo gravitacional vertical es independiente de la componente horizontal de la velocidad. De aquí se sigue que en tal campo

gravitacional la aceleración vertical de un sistema mecánico, o de su centro de gravedad, opera en forma independiente a su energía cinética interna. Pero en la primera teoría que investigué, la aceleración del cuerpo que cae no era independiente de la velocidad horizontal ni de la energía interna del sistema.

En su artículo, Einstein procede a mencionar el principio de equivalencia, piedra angular de la nueva teoría:

Lo anterior no se ajusta al viejo hecho experimental según el cual todos los cuerpos tienen la misma aceleración en un campo gravitacional. Esta ley, que también puede formularse como la ley de la igualdad entre la masa inercial y la masa gravitacional, se me aclaró luego en todo su significado. Estaba, en un alto grado, sorprendido por su persistencia, y adiviné que en ella debería hallarse la clave para entender más a fondo la inercia y la gravitación. No tenía serias dudas respecto a su estricta validez, aun sin conocer los resultados de los admirables experimentos de Eötvös, que –si mi memoria no falla– sólo conocí tiempo después. Entonces abandoné, pues era poco adecuado, tratar el problema de la gravitación tal como indiqué antes, en el marco de la teoría especial de la relatividad. Claramente esos intentos no hacían justicia a la propiedad más fundamental de la gravitación. El principio de la igualdad de las masas inercial y gravitacional se podría ahora formular claramente como sigue: En un campo gravitacional homogéneo los movimientos ocurren en la misma forma que en ausencia del campo gravitacional si aquéllos se refieren a un sistema de coordenadas acelerado. Si este principio –*el principio de equivalencia*– fuera válido para dos eventos cualesquiera, tendríamos una indicación de que el principio de relatividad debería ser extendido a sistemas de coordenadas en movimiento no-uniforme unos respecto a otros, si es que deseáramos llegar a una teoría, fácil y natural, de los campos gravitacionales. Reflexiones como éstas me mantuvieron ocupado entre 1908 y 1911; trataba de sacar de ellas conclusiones particulares, de las cuales no me propongo hablar aquí. Por el momento, lo único realmente importante fue el descubrimiento de que sólo se podría esperar una teoría razonable de la gravitación si se extendiera el principio de relatividad.

Llegado a este punto, el gran físico alemán nos relata cómo llegó a introducir ideas geométricas en su teoría de la gravitación.

Lo que se requería, por tanto, era una teoría cuyas ecuaciones mantuvieran su forma aun en el caso de transformaciones no-lineales de las coordenadas. Yo no hubiera sido capaz en ese entonces de afirmar si lo anterior era aplicable a absolutamente todas las transformaciones de coordenadas, o solamente a algunas de ellas.

Pronto vi que el introducir transformaciones no-lineales, como exigía el principio de equivalencia, era inevitablemente fatal para la interpretación más simple de las coordenadas; es decir, ya no se podría pedir que las diferenciales de las coordenadas tuvieran un significado directo en términos de medidas realizadas con escalas para medir longitudes y relojes para medir tiempos. Mucho me molestó este hecho, ya que me tomó largo tiempo ver lo que realmente significaban las coordenadas en la física. No hallé la salida de este dilema sino en 1912, lo que se me ocurrió luego de la siguiente consideración:

Se debería encontrar una nueva formulación de la ley de la inercia que, en ausencia de un campo gravitacional real, se convirtiera en la de Galileo. Esta última se reduce a lo siguiente: un punto material que no esté actuado por fuerza alguna se representará en el espacio de cuatro dimensiones por una línea recta, o sea, por una línea tan corta como sea posible, o más correctamente, por una línea extrema. Este concepto presupone el de longitud de un elemento de línea, es decir, la existencia de una métrica. En la teoría especial de la relatividad, como mostró Minkowski, la métrica es cuasi-euclidiana; en tal caso, el cuadrado de la longitud ds del elemento de línea es una función cuadrática bien definida de las diferenciales de las coordenadas.

Si, por medio de una transformación no-lineal, se introducen otras coordenadas, $(ds)^2$ continúa siendo una función homogénea de las diferenciales de las coordenadas, aunque los coeficientes en esta función (que llamaremos $g_{\mu\nu}$) ya no sean constantes sino que se vuelvan ciertas funciones de las coordenadas. En términos matemáticos, ello significa que el espacio físico (tetradimensional) tiene una métrica de Riemann. Las líneas extremas temporaloides de esta métrica nos proveen con la ley de movimiento de un punto-masa que no se halle sujeto a fuerza alguna salvo la gravedad. Los coeficientes $g_{\mu\nu}$ de esta métrica describen el campo gravitacional con referencia al sistema de coordenadas seleccionado. Así, se había encontrado una formulación natural del principio de equivalencia y su extensión a un campo gravitacional cualquiera, constituiría una hipótesis perfectamente legítima.

La solución del dilema que antes mencioné fue, por tanto, como sigue: Las diferenciales de las coordenadas no tienen significado físico, sólo lo tiene la métrica riemanniana asociada con ellas. Se habría entonces encontrado una base de la teoría general de la relatividad, que nos permitiría trabajar. Dos problemas quedaban por resolver, sin embargo:

1) Si se da una ley para el campo en la terminología de la teoría especial de la relatividad, ¿cómo puede transferirse esa ley al caso de una métrica riemanniana?

2) ¿Cuáles son las leyes diferenciales que determinan la métrica riemanniana $g_{\mu\nu}$?

Trabajé en estos problemas entre 1912 y 1914 junto con mi amigo Grossmann. Encontramos que los métodos matemáticos para resolver el problema (1) estaban al alcance de nuestras manos con el cálculo diferencial de Ricci y Levi-Civita.

En cuanto al problema 2), su solución obviamente requería sistemas diferenciales invariantes del segundo orden, formados por las $g_{\mu\nu}$. Pronto vimos que estas invariantes ya habían sido establecidas por Riemann —el tensor de curvatura—. Habíamos ya obtenido las ecuaciones correctas del campo gravitatorio dos años antes de la publicación de la teoría general de la relatividad, pero no éramos capaces de ver cómo se las podría usar en física. Por el contrario, me sentía seguro de que no haríamos justicia al experimento. Más aún, creía poder mostrar, en base a consideraciones

generales, que una ley de gravitación invariante frente a cualquier transformación de coordenadas no sería consistente con el principio de causalidad. Estos yerros del pensamiento me costaron dos años de trabajo, en exceso fuerte, hasta que al fin reconocí mis errores y, al terminar 1915, logré atar cabos y ligar mis resultados con lo observado astronómicamente, para entonces retornar gustosamente a la curvatura riemanniana.

A la luz del conocimiento obtenido, el feliz logro parece casi una trivialidad y cualquier estudiante inteligente puede entenderlo sin mucha dificultad. Pero aquellos años de ansiosa búsqueda, con su intensa espera, sus vaivenes de confianza y de desgaste, y la emergencia final hacia la luz, eso sólo aquellos que lo hayan experimentado lo comprenderían.



IV. LAS IDEAS DE LOS GRIEGOS

EN LA nota histórica de Einstein nos hemos tropezado —tal vez en sentido literal— con muchos términos que seguramente son oscuros para el lego. No sabe, quizá, qué es un sistema de referencia inercial, ni qué es la ley de la gravitación o en qué consiste la teoría especial de la relatividad. Menos aún entiende qué son las diferenciales de coordenadas o el tensor de curvatura de Riemann o el cálculo de Levi-Civita. Un poco de todo ello se encontrará en lo que sigue, de tal forma que la parte central del libro bien podría haberse llamado "Notas para poder entender una nota histórica de Einstein sobre el origen de..." Empecemos, pues, por el principio y remontémonos a la cultura griega para llegar a los descubrimientos de Galileo, Newton y Einstein.

En un plumazo, la relación de la ciencia griega con el problema de la gravitación puede resumirse así, siguiendo un orden más o menos cronológico:

El primero de los siete sabios griegos fue Tales (624-546 a.C.), quien nació y murió en Mileto. Predijo un eclipse solar, convirtió a la geometría egipcia en un estudio abstracto e introdujo, al medir la altura de una pirámide, las primicias de la trigonometría. Contemporáneo de Tales fue Anaximandro (610-546 a.C.), quien también nació y murió en Mileto. El introdujo en la astronomía la idea de la esfera celeste, idea que habría de evolucionar hasta su culminación con la imagen ptolemaica del universo, cerca de medio milenio más tarde.

Entre los filósofos griegos presocráticos, tal vez sea Pitágoras (582-497 a.C.) el más interesante para nuestra historia. La escuela pitagórica fundó todo un culto, pleno de misterio y también de poder político; en el misticismo de Pitágoras, los números y sus relaciones jugaban un papel preponderante. Los pitagóricos estudiaron el sonido de los instrumentos musicales, encontraron los números irracionales y, sobre todo, el teorema llamado de Pitágoras: el cuadrado de la longitud de la hipotenusa de un triángulo rectángulo es igual a la suma de los cuadrados de los catetos. Pitágoras también se dio cuenta de que la estrella matutina y la vespertina eran el mismo cuerpo celeste: el planeta Venus. Además, enseñó que la Tierra es esférica y que el Sol, la Luna y los planetas siguen movimientos independientes a los de las estrellas. De ahí empiezan a surgir nuevas esferas, además de la propuesta por Anaximandro. La profusión de esferas celestes llegaría a ser muy grande, hasta que los estudios de Kepler, dos milenios después, forzaron a que todas ellas se evaporaran.

Filolao (480 a.C.), uno de los miembros prominentes de la escuela pitagórica, imaginó que la Tierra daba vueltas en una esfera alrededor de un fuego central fijo. Reflejo de este fuego central era el Sol que, junto con la Luna, los otros planetas y las estrellas, también circulaba alrededor del fuego central en esferas separadas. Como en aquel entonces sólo se conocían los planetas Mercurio, Venus, Marte, Júpiter y Saturno, la imagen de Filolao suponía la existencia de nueve esferas. Pero eso repugnaba al misticismo numérico de los pitagóricos, que adjudicaba ciertos poderes mágicos al número 10 ($10=1+2+3+4$). Por ello, Filolao inventó otro planeta, la Contratierra, siempre oculto a nosotros detrás del Sol, o, según dicen otros, entre la Tierra y el fuego central, para protegerla de los calores de éste. En todo caso, Filolao fue el primero en suponer que la Tierra se movía.

Medio siglo después de Filolao nace el gran filósofo ateniense Platón, que también gustaba de las idealizaciones propias de las matemáticas. Introdujo los poliedros regulares —los llamados sólidos platónicos— como esencia de los cuatro elementos básicos de la naturaleza, y también decidió que los cuerpos celestes habrían de ser perfectos; por ello, se moverían a lo largo de un círculo —la curva perfecta— alojada en una esfera de cristal —el sólido perfecto—.

La Academia fundada por Platón tuvo una muy marcada influencia en la cultura helénica. Allí estudiaron el astrónomo y matemático Eudoxio (408-335 a.C.) y el más famoso de los discípulos de Platón, Aristóteles. Aunque Eudoxio aceptó el principio platónico de la perfección, y con ello las órbitas

planetarias circulares, no pudo menos que darse cuenta de que las trayectorias observadas no concordaban con esas curvas perfectas. En el modelo de Eudoxio, el movimiento de los cuerpos celestes se representaba mediante un conjunto de esferas: la correspondiente a un planeta tenía sus polos sobre otra esfera, que a su vez descansaba sobre otra de ellas y así sucesivamente. El astrónomo griego pensaba en 27 esferas, pues cada planeta requería de cuatro de ellas. Así explicaba las posiciones aparentes de los astros, aunque no los cambios de brillantez de los planetas, que interpretaba correctamente como producidos por sus diferentes distancias de la Tierra.

Aristóteles (384-322 a.C.), el más universal de los sabios griegos, fue, para la ciencia, un gran biólogo más que un gran físico. Disectó y clasificó de manera razonable muchas especies animales, entendió que el delfín no es un pez y, en cierto sentido, delineó una jerarquía de los seres vivos que insinuaba la idea de evolución. Con las ciencias exactas, Aristóteles no logró tales éxitos. Aceptó las esferas de Eudoxio pero las aumentó en número, con lo que éste superaba ya el medio centenar, erosionando así la sencillez de los modelos primitivos. Además, a diferencia de Eudoxio, que probablemente imaginaba las esferas celestes como una mera abstracción matemática, parece ser que el gran filósofo griego les confería una existencia física y real. Para la historia de la gravitación que hemos empezado a relatar, son también importantes las ideas de Aristóteles sobre la caída de los cuerpos terrestres y la separación que él hacía entre el movimiento de éstos y el de los cuerpos celestes. Los terrestres eran mutables y corruptos, los celestes permanentes; éstos, en su movimiento, no intentaban llegar a ninguna parte, y los primeros buscaban el lugar que les era propio, con mayor afán cuanto más pesados fueran. De ahí que un cuerpo pesado cayera más rápidamente que uno ligero.

Como será más claro al hablar de Einstein y su teoría general de la relatividad, la gravitación y la geometría han evolucionado al unísono. Euclides sintetizó magistralmente el conocimiento geométrico de los griegos en su magnífico tratado *Elementos*. De la vida de Euclides poco se sabe; se cree que nació alrededor de 300 años antes de Cristo pero se ignora la fecha de su deceso. Sin embargo, sabemos que trabajó en Alejandría, donde uno de los generales de Alejandro Magno había establecido una biblioteca maravillosa y una gran universidad, el Museo. Con todo ello la investigación científica de frontera se trasladó en esa época de Atenas a Alejandría. Más adelante hablaremos otra vez de Euclides y sus postulados, en particular del quinto, que durante siglos fueron considerados como parte de la verdad absoluta. Al percatarse de que el quinto postulado de Euclides —por un punto localizado fuera de una línea recta sólo puede trazarse una línea paralela a ésta— podía cambiarse sin alterar la fortaleza lógica de la geometría, el matemático ruso Nikolai Lobachevski ensanchó la geometría y con ella las matemáticas todas. Georg Riemann, otro gran matemático del siglo XIX, habría de culminar esos esfuerzos y establecer definitivamente la ciudadanía científica de las geometrías no-euclidianas. Sobre la geometría de Riemann, como ya pudimos leer en la nota histórica de Einstein, descansa la teoría general de la relatividad.

Contemporáneo de Euclides en Alejandría es el astrónomo griego Aristarco (320-250 a.C.), quien señaló por ahí del año 260 antes de Cristo que tanto la Tierra como los planetas dan vueltas alrededor del Sol. Esta imagen heliocéntrica —que bien vale para hacer de Aristarco el Copérnico de la Antigüedad— no fue aceptada por otros filósofos griegos y no habría llegado hasta Copérnico de no ser porque Arquímedes, el más grande de los científicos y matemáticos de los tiempos antiguos, la mencionó en alguno de sus escritos. Otro matemático griego, alumno tal vez de Arquímedes en el Museo de Alejandría, es importante para nuestra historia. El llamado Gran Geómetra, Apolonio, estudió tres curvas: la elipse, la parábola y la hipérbola, que Euclides no analizó. Tales curvas —que se llaman secciones cónicas, pues se dibujan al cortar un cono con un plano situado en el ángulo apropiado— serían cruciales en el desarrollo del modelo planetario y de la gravitación: El gran físico italiano Galileo Galilei descubrió que una bola de cañón recorre una trayectoria parabólica; por su parte, Kepler y Newton descubrieron, dieciocho siglos después de los trabajos geométricos de Apolonio, que las órbitas de los cuerpos celestes deberían ser algunas de estas cónicas, y no por fuerza círculos. Sin embargo, Apolonio no usó, al referirse al movimiento de los cuerpos en el sistema solar, sus curvas cónicas. Más bien, buscó un compromiso entre Eudoxio y Aristarco: los planetas, según Apolonio, dan vuelta alrededor del Sol, pero éste los arrastra consigo y con ellos circunda la Tierra. Así empieza a generarse el modelo de ciclos y epiciclos, que habría de culminar con Hiparco y Ptolomeo.

Así como Arquímedes fue el más grande matemático entre los griegos, Hiparco fue el mayor de los astrónomos. Y como Arquímedes, quien emigró a Siracusa, Hiparco tampoco trabajó en Alejandría sino en la isla de Rodas, en el mar Egeo. Ahí instaló su observatorio y desarrolló muchos de los instrumentos para la observación de los cuerpos celestes. Hiparco hizo un mapa del cielo, descubrió la precesión de los equinoccios y clasificó las estrellas de acuerdo a su brillantez, con lo cual introdujo las estrellas de primera a sexta magnitud, estas últimas apenas visibles. Empero, su más grande hazaña fue establecer un nuevo sistema para el mundo, un nuevo esquema del sistema planetario. Cada uno de los siete planetas se movía en una pequeña esfera, cuyo centro a su vez recorría una más grande: el epiciclo se mueve sobre la esfera deferente. Además, el centro de la deferente no coincidía exactamente con el de la Tierra, sino con un punto cercano a él, llamado el punto excéntrico, que también circunda al centro de la Tierra. Con su complicada geometría de epiciclos, deferentes y excéntricos, Hiparco preservaba los axiomas de Platón y Aristóteles al mismo tiempo que lograba explicarse el movimiento de los planetas, pues podía calcular su posición a un tiempo dado. Así vencía a Aristarco y sus ideas heliocéntricas, que debieron reposar hasta la revolución copernicana.

El último de los sabios griegos —aunque tal vez haya nacido en Egipto— que es importante para nuestra historia es Ptolomeo. Él jugó en la astronomía helénica un papel semejante al que Euclides desempeñó en la geometría: Ptolomeo produjo la gran síntesis. Ptolomeo, que vivió en el primer siglo de la era cristiana, se basó en los trabajos de Hiparco y utilizó sus epiciclos y excéntricos. Las predicciones del sistema ptolemaico eran lo suficientemente precisas como para ajustar las observaciones hechas a simple vista. No fue sino hasta los tiempos de Tycho Brahe, 1 400 años más tarde, que se hizo necesaria una teoría mejor que la de Ptolomeo. De ahí que sus ideas, guardadas celosamente por los sabios árabes después de la caída del imperio romano, sobrevivieran a la Edad Media y llegaran incólumes hasta los tiempos de Colón y el Renacimiento.

[Indice](#)



V. UN LIBRO QUE CONMOVIÓ AL MUNDO

EN 1987 se cumplen tres siglos de la publicación del libro *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* —o simplemente, *Principia*— escrito por Isaac Newton. Esta obra es, sin duda, una de las mayores creaciones del intelecto. Los *Principia* fueron escritos en latín y publicados en 1687 bajo los auspicios económicos y editoriales de Edmund Halley, astrónomo británico amigo de Newton y mejor conocido porque un famoso cometa lleva su nombre. La versión inglesa de este libro crucial en la historia de la ciencia apareció cuarenta y dos años después, en 1729, cuando ya Newton había muerto. Hubo que pasar cerca de tres siglos para que fuera publicado en nuestra lengua: ¡la primera edición en español data de 1982!

Isaac Newton gozó en vida de fama inusitada y gran respeto como ningún otro científico, con excepción, tal vez, de Arquímedes antes que él y de Einstein en siglos posteriores. A Newton se deben cuatro enormes contribuciones a la ciencia: formuló las leyes de la mecánica, hoy llamada newtoniana en su honor; descubrió la ley de la gravitación universal, con lo cual introdujo en la física una de las interacciones que hasta el día de hoy consideramos básicas; realizó, además, interesantísimos experimentos ópticos y propuso teorías para entender qué es la luz; y finalmente, debemos mencionar que Newton fue no sólo un gran físico, sino también uno de los matemáticos más potentes de la historia: en este campo su contribución más importante es la invención del cálculo infinitesimal, que él llamaba cálculo de fluxiones. Los dos primeros temas se hallan en los libros I y III de los *Principia*; sus estudios sobre la luz fueron expuestos en otra de sus obras famosas, la *Optica*, y sus hallazgos matemáticos están más bien dispersos en obras como la *Epistola Prior*, *De Analysisi*, el folleto *Methodus Fluxionum et Seriatum Infinitarum*, o el apéndice *De Quadratura* a su libro de óptica.

Isaac Newton nació en Woolsthorpe, Lincolnshire, en Inglaterra, el día de Navidad de 1642, si nos guiamos por el calendario juliano, vigente entonces en la Gran Bretaña, o bien el 4 de enero de 1643 si empleamos el hoy habitual calendario gregoriano. En cualquier caso, Newton nace cuando todavía no se celebraba el primer aniversario de la muerte de Galileo, su gran antecesor en la física y en la astronomía. Newton nació granjero y no conoció a su padre, pues éste murió cuando aún el hijo no había llegado. Su madre contrajo segundas nupcias tres años después y mandó al niño a vivir con sus abuelos. El joven Isaac nunca quiso bien a su padrastro, quien murió cuando Newton cursaba la escuela elemental. Ya que sus inclinaciones académicas resaltaban —si bien no siempre había sido un estudiante brillante— uno de sus tíos, miembro del Trinity College de Cambridge, insistió en que fuera enviado a esta Universidad. Así fue, para gloria de Inglaterra, la cual perdió al que hubiera sido un mediocre granjero pero ganó al que habría de ser su más grande hombre de ciencia.

Cuando Newton acababa de graduarse, en 1665, la peste asoló Londres y amenazaba a Cambridge; por ello se refugió en la granja de su madre. Para ese entonces, el joven recién graduado había ya encontrado el teorema del binomio, la expresión para elevar la suma de dos cantidades a y b a una potencia cualquiera. Se hallaba, además, en los albores del cálculo infinitesimal. Sin embargo, y de acuerdo al propio Newton, en esos años de granjero ocurrió algo más grande todavía: vio caer una manzana y, en un golpe genial de intuición científica, comenzó a especular si acaso el jalón que había tumbado a la manzana no sería el mismo que mantendría a la Luna en su órbita. Así daba Newton los primeros pasos hacia una teoría de la gravitación, teoría que sería matemáticamente precisa y que publicaría veinte años después en los *Principia*.

La ley de la gravitación universal nos dice que entre dos masas cualesquiera existe una fuerza, cuya magnitud es proporcional al producto de las masas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que las separa. Con esta ley se relacionan los movimientos de los cuerpos celestes con los terrestres, por lo que representa la primera gran síntesis en la historia de la física. La ley que Newton encontró es todavía hoy uno de los pilares de esta ciencia. Según las teorías en boga a finales del siglo XX, en la naturaleza existen sólo cuatro fuerzas fundamentales: la interacción fuerte, la electromagnética, la interacción débil y

¡la fuerza gravitatoria de Newton! La enorme hazaña newtoniana, plasmada en el libro III de los *Principia*, puede apreciarse mejor aún si nos situamos en su época, todavía permeada por la tradición aristotélica:

en los cielos rigen leyes distintas que en la Tierra.

A diferencia de muchos otros filósofos naturales que lo precedieron, Newton era un gran matemático y podía, por tanto, calcular. Si suponía válida su ley de gravitación, podría averiguar qué tanto caía la Luna, es decir, qué tanto se desvía nuestro satélite de una órbita rectilínea en su trayectoria alrededor de la Tierra. Eso fue precisamente lo que hizo, y al comparar su resultado con las observaciones astronómicas encontró, para su gran desilusión, una desviación cercana al 12%. A causa de ello abandonó el problema de la gravitación durante quince años y se dedicó a la óptica. Con sus prismas descompuso la luz blanca en colores y... se volvió famoso.

En 1667 regresó Newton a Cambridge y dos años después lo nombraron profesor lucasiano, para ocupar la cátedra fundada con las aportaciones de Henry Lucas, hombre adinerado. Sólo cinco años después, Newton fue electo miembro de la Royal Society. Muy pronto se estableció la enemistad entre él y Hooke, el descubridor de la célula. Tal rivalidad habría de durar toda su vida. Por aquella época, Newton desarrolló los fundamentos del cálculo, casi al mismo tiempo que el matemático alemán Gottfried Wilhelm Leibnitz. Poco a poco el sentido patriótico mal entendido condujo a una inútil polémica: se trataba de precisar quién y en dónde había generado el cálculo infinitesimal, herramienta indispensable para formular matemáticamente muchísimos problemas científicos. En la Europa Continental se aceptó la notación de Leibnitz, más conveniente que la inglesa, pero las matemáticas británicas continuaron empleando la notación de Newton. De hecho, los ingleses son más conservadores de lo que cualquiera pueda imaginar: en Cambridge, por ejemplo, continuaba enseñándose la mecánica con el gran libro de Newton como texto hasta ya bien entrado el siglo XX. Y esto a pesar de las dificultades que se tienen para seguir los razonamientos newtonianos, pues el proceso de límite, esencial al cálculo, está en ellos más bien oculto. Paradójicamente, la gran figura de Newton y su peso incalculable sobre las matemáticas británicas retrasaron el progreso de éstas por mucho tiempo. Sería hasta la primera mitad del siglo XIX cuando las matemáticas volverían a brillar en Gran Bretaña, con Hamilton, Boole y Stokes, todos ellos conectados con Irlanda, curiosamente.

Newton continuó su interés por la óptica durante varios años. Desarrolló el telescopio reflector y una teoría corpuscular de la luz. Su mayor contribución a la física, sin embargo, vendría en la década de 1680 cuando Halley, su gran amigo, le instó a que retomara el problema del movimiento de los cuerpos celestes. Entonces Newton repitió su cálculo de la órbita lunar, ahora empleando un valor más preciso para el radio de la Tierra y con ayuda del cálculo infinitesimal que él mismo había inventado. Todo ello culminaría en 1687 con la publicación de los *Principia*, que tal vez sea el último gran libro científico escrito en el estilo de los griegos, a la manera de los *Elementos* de Euclides, al mismo tiempo que es el primer gran tratado moderno de física. Del gran libro newtoniano se editaron en latín 2 500 ejemplares y, de inmediato, su enorme valor fue reconocido por muchos científicos. Los *Principia* se publicaron, sin embargo, luego de fuertes controversias y problemas financieros. La Royal Society, que debería editarlo, no tenía dinero. Además, Hooke, el eterno enemigo de Newton, le disputaba la paternidad de la ley de la gravitación universal, pues alegaba que él había sido el primero en enunciarla, en una carta dirigida a Newton. Por todo ello, aunque a regañadientes, Newton finalmente accedió a mencionar a Hooke en su libro. En cualquier caso, la Royal Society se negó a verse en medio de la controversia y a publicar los *Principia*. Entonces Halley, el astrónomo que estudiaba los cometas, cubrió los gastos de publicación e incluso corrigió galeras.

La gran obra de Newton y de la física del siglo XVII pudo así, finalmente, ver la luz.

Los *Principia* constan de una introducción, donde se plasman los conceptos de espacio y tiempo absolutos y se postulan las tres leyes de movimiento, y de tres libros:

I.El movimiento de los cuerpos.

II.El movimiento de los cuerpos (en medios resistentes).

III.El sistema del mundo (en tratamiento matemático).

En todos ellos se expresan definiciones y axiomas y, cada uno, está pleno de lemas y proposiciones, además de escolios. En el libro se codifican los hallazgos de Galileo en la forma de tres leyes de movimiento. Luego Newton, poderosamente, usa la geometría y su versión del cálculo infinitesimal —el cálculo de fluxiones— para hallar órbitas de partículas en distintos casos. En el segundo libro, el cual es de menor envergadura que los otros dos, ataca problemas de péndulos y otros sistemas mecánicos en medios que se oponen al movimiento según distintas fuerzas. Y, en el tercer libro, propone la ley de la gravitación universal, explica las leyes de Kepler, la precesión de los equinoccios, algunas irregularidades en los movimientos planetarios, las variaciones en el movimiento de la Luna, las mareas producidas por ésta y por el Sol... En fin, Newton propone y expone toda una teoría matemática del mundo cercano a la Tierra.

Con sus *Principia*, Newton imitó a los filósofos griegos no sólo en la forma sino en el fondo, pues en su libro propone un esquema integral del mundo. Empero, qué duda cabe, los superó en mucho. A diferencia de los modelos de la Antigüedad, el newtoniano se basa en unos pocos supuestos —el tiempo y el espacio absolutos, sus tres leyes de movimiento y la ley de la gravitación universalmente válida— que luego son convertidos, con el uso de potentes matemáticas, en conclusiones rigurosas. En este libro, somos testigos de cómo Newton, el gran matemático, auxilia a Newton, el gran físico, para explicar, con su *Sistema del Mundo*, una gran cantidad de observaciones hechas por sus colegas los astrónomos, que por aquel entonces formaban la comunidad científica más numerosa y, probablemente también, la más avanzada.

Isaac Newton dijo una vez: "Si he podido ver más lejos, es porque estoy montado sobre los hombros de gigantes". Con ello se refería al cúmulo de científicos que habían forjado la ciencia antes de él. Para nuestra historia, cuatro de ellos sobresalen: Copérnico, Tycho Brahe, Kepler y, sobre todo, Galileo.

Veamos, pues, hasta dónde habían llegado la física y la astronomía antes de que aparecieran los *Principia*.



VI. SOBRE LOS HOMBROS DE GIGANTES

SON cuatro los gigantes en que Newton se apoyó: Nicolás Copérnico, Tycho Brahe y Johannes Kepler, desde la perspectiva astronómica, así como Galileo Galilei, el fundador de la ciencia experimental, desde el punto de vista físico.

Veinte años antes del descubrimiento de América, nace Copérnico en la ciudad polaca de Torun. Estudió primero matemáticas en Cracovia y luego medicina y derecho canónico en Italia, donde se interesó por la astronomía. Copérnico resucitó, para explicar las posiciones planetarias, la vieja idea heliocéntrica de Aristarco. Sin embargo, aunó sus conocimientos matemáticos al de las tablas astronómicas y con ello inició la revolución científica que destronó a la ciencia griega; tal revolución habría de culminar con Newton, ciento cincuenta años después. Con el sistema copernicano era simple explicar por qué los planetas más cercanos al Sol, Mercurio y Venus, no se alejarían, vistos desde la Tierra, más allá de una cierta distancia del Sol, y por qué Marte, Júpiter y Saturno aparentemente podrían sumirse en el cielo. No obstante, el sistema planetario de Copérnico, con sus órbitas circulares, no podía prescindir de los epiciclos, que lo complicaban igual que al sistema ptolemaico.

En la católica Polonia, Copérnico llegó a ser canónigo de la Catedral de Frauenberg, donde hoy se halla enterrado. Dada la posición de la Iglesia, las ideas copernicanas eran arriesgadas y el gran sabio polaco sólo se atrevió, por allí de 1530, a circular en forma manuscrita sus ideas sobre el sistema del mundo. Finalmente, y consciente del riesgo que ello implicaba, se decidió a publicar su famoso libro *De revolutionibus orbium coelestium*, que hábilmente dedicó al papa Pablo III. Muchas historias corren sobre este famoso libro que, como otros tratados científicos de esos primeros siglos de la ciencia occidental, tuvo una historia azarosa. Se dice, por ejemplo, que el matemático alemán Rheticus, discípulo de Copérnico, fue quien lo convenció de publicar su manuscrito, prometiéndole hacerse cargo de cuidar la edición. El matemático dejó el encargo a la mitad y pidió a un ministro luterano que supervisara el libro. Dada la firme oposición de Lutero mismo a las ideas de Copérnico, el ministro luterano agregó un prefacio a la obra, donde se afirma que la teoría copernicana era tan sólo un método de cálculo de las posiciones planetarias y no se intentaba con ella describir la realidad. El ministro luterano omitió indicar su nombre en el prefacio, que por mucho tiempo se atribuyó a Copérnico. Unos dicen, también, que el libro llegó a las manos del sabio cuando yacía en su lecho de muerte; sin embargo, esta historia podría ser apócrifa, pues se ha encontrado una copia del libro fechada un mes antes de la muerte del gran pensador polaco.

Un gigante que no creyó en las ideas heliocéntricas de Copérnico fue el astrónomo real de Dinamarca, Tycho Brahe. Noble danés, llamó la atención de su rey al publicar un pequeño fascículo, *De Nova Stella*, en el que describe su descubrimiento del nacimiento de una nueva estrella el 11 de noviembre de 1572. En realidad Tycho observó lo que ahora llamamos una nova, que es una estrella que explota y por ello su brillo aumenta de súbito. Para el ojo desnudo de Tycho, que observaba el cielo sin que aún hubiera telescopios, la nova pareció una nueva estrella. Por ello, su pequeño libro arremetió contra la idea aristotélica de un cielo impasible y perfecto. El rey Federico II decidió servir de mecenas al astrónomo y financió con largueza el primer observatorio real. En éste, Tycho observó con cuidado un cometa y demostró que su órbita alargada debería cortar a la de los planetas. Un golpe más a las teorías de Aristóteles y a la existencia de las esferas planetarias en que muchos astrónomos creían en esa época.

En 1597, cuatro años antes de su muerte, Tycho emigró a Praga, por aquel entonces parte de Alemania. Allí recolectó sus observaciones, tomadas con gran paciencia durante muchos años, y preparó sus tablas de los movimientos planetarios. Aunque continuaba en la creencia firme de que la Tierra no se mueve, legó a su alumno Kepler sus valiosísimas tablas, preparando así el camino a la síntesis newtoniana. Por todo ello Tycho tiene un bien ganado lugar entre los gigantes científicos del siglo XVI.

Kepler y Galileo nacen con siete años de diferencia, uno en 1571 en Alemania, y el segundo en 1564 en Pisa, la ciudad de la torre inclinada. El astrónomo alemán, versado en matemáticas, recibió como herencia

de su maestro Tycho las tablas planetarias, que incluían los movimientos de Marte. Kepler era un místico y, como muchos astrónomos de su época, dado a la astrología. Creía que los planetas en su viaje emiten música, y trató de cuantificar algo semejante a una teoría platónica del movimiento planetario. Buscó en vano aprovechar los sólidos platónicos, aquellos que son regulares, para entender las observaciones de Tycho. Finalmente intentó una órbita ya no circular y llegó a la elipse, una de las curvas cónicas que había estudiado siglos antes Apolonio.

La elipse es una curva que todos hemos visto: basta iluminar una pared plana con una linterna que emite un cono de luz; en la pared se ve un círculo achatado, que tiene dos ejes perpendiculares entre sí, llamados mayor y menor. Además, la elipse tiene dos focos, alojados a lo largo del eje mayor. De hecho, una elipse se define como aquella curva trazada por los puntos colocados de tal forma que la suma de sus dos distancias a los focos sea constante. Esta definición da la base para la técnica —llamada de los jardineros, pues a veces éstos la emplean para dibujar la forma de un rodete de flores— que se usa para construir una elipse: clávense dos alfileres en un papel plano y amárrense a ellos un hilo sin tensar. Luego, con la punta de un lápiz ténlese el hilo y deslícese la punta del lápiz sobre el papel. La curva que resulta es una elipse.

Pues bien, primero Kepler encontró que Marte seguía en su viaje una elipse, en uno de cuyos focos se hallaba el Sol. Luego pudo también ajustar elipses a las órbitas de los otros planetas; en todas ellas, el Sol ocupaba un foco de la órbita. Este es el contenido de la primera ley de Kepler, que publicó en su libro *Astronomía Nova* en 1609. En este libro aparece, también por primera vez, la que ahora se conoce como segunda ley de Kepler: una línea recta que une el planeta con el Sol barre áreas iguales en tiempos iguales cuando el planeta recorre su órbita. Con todo ello, Kepler terminaba con las especulaciones griegas sobre el sistema planetario y se establecía el sistema heliocéntrico, con lo cual se destruían las órbitas circulares y sus molestos epiciclos. Para que el Sol controlara el movimiento de los planetas, habría de ejercer una fuerza sobre éstos. Kepler siguió en este punto las ideas del médico y físico inglés William Gilbert, autor del famoso libro sobre imanes *De Magnete*, y aceptó que la atracción del Sol era en alguna forma de origen magnético. Galileo mismo no llegó a conclusiones mejores. Sería Newton el que daría, al introducir la ley de la gravitación universal medio siglo después, una explicación más razonable.

Muchas otras contribuciones científicas se deben a Kepler. En un libro pleno de misticismo esconde su tercera ley: el cuadrado del periodo del planeta es proporcional al cubo de su distancia al Sol. O, más precisamente, el cuadrado del tiempo de recorrido de un planeta alrededor del Sol crece como el semieje mayor de la órbita planetaria elevado a la tercera potencia. Además, Kepler mejoró el telescopio que había recibido de Galileo y estudió la reflexión de la luz por espejos parabólicos, por lo cual podría considerarse como uno de los fundadores de la óptica moderna. Por todo ello, el científico alemán tiene un bien ganado lugar entre los gigantes que Newton mencionó.



VII. LOS PROCESOS DE GALILEO

LA HISTORIA de Galileo, padre de la ciencia experimental, puede para el propósito de este relato dividirse en dos: la de Galileo, el astrónomo, y la de Galileo, el físico. La primera es casi una historia de aventuras, donde se mezclan la ciencia y la política con las instituciones religiosas del siglo XVI. En ella Galileo se muestra débil, poco apto para sobrevivir a las intrigas de palacio, tal como lo vio Bertolt Brecht en su magistral pieza teatral. La segunda historia, la del físico Galileo, es más parecida a la de un gran científico moderno. Aquí vemos la aventura del pensamiento humano llegar a uno de sus climas. Galileo, como astrónomo, sigue la huella de sus ilustres predecesores y hace contribuciones importantes, que lo llevan a un enfrentamiento con el poder público. Galileo, como físico, cambia la ciencia al fincar los principios de ésta en los experimentos y se nos muestra, además, como un gran maestro de ese fructífero rincón, a veces olvidado, de la física: el laboratorio de los experimentos pensados.

Empecemos por un breve relato de la vida de Galileo como astrónomo. Galileo Galilei, verdadero heredero del Renacimiento, nació en Pisa en 1564. Su padre, matemático, al saber de los magros salarios que entonces como hoy puede recibir un profesor de matemáticas, lo impulsó a que fuera médico. Entró pues Galileo a estudiar medicina a la Universidad de Pisa; pronto se fascinó, más que con la salud de otros, con la geometría y con el movimiento de los péndulos. Convenció a su padre e Italia perdió al que hubiera sido uno más de sus médicos, pero el mundo de la ciencia ganó a un gran creador de métodos e ideas.

Cuando en 1604 ocurre la nova que Kepler describió en su *Astronomia Nova*, Galileo aprovecha este suceso y argumenta contra lo inmutable de los cielos. Este fue uno más de los puntos de vista aristotélicos con los cuales no estaría de acuerdo el gran científico italiano. Galileo abandona entonces Pisa y va a trabajar a Padua, donde entabla correspondencia con Kepler. En sus cartas admite ya su adhesión a las teorías de Copérnico, aunque el fantasma de Bruno, ejecutado en la hoguera en 1600, lo fuerza a que con prudencia evite hacer pública su creencia en el modelo copernicano.

En el año de 1609 ocurre un suceso importante en la vida de Galileo, el observador astronómico: llega a sus oídos que en Holanda se había inventado un tubo para ver de lejos: el telescopio. Pronto construye el suyo y así comienza la era del telescopio en la astronomía. Con su aparato descubre las manchas solares y de ahí calcula la rotación del Sol sobre su eje. Encuentra las cuatro lunas de Júpiter y con ellas un modelo solar copernicano en miniatura. La prueba irrefutable de que no todos los cuerpos astronómicos circundan la Tierra estaba a la vista de Galileo y su telescopio. Descubre también las fases de Venus, una prueba más de que Copérnico estaba en lo correcto. Galileo anuncia sus hallazgos en un pequeño periódico, *El Mensajero Sideral*, y genera con ellos gran entusiasmo, pero también grandes enojos. Se inicia así el proceso de Galileo.

En un artículo reciente, aparecido en la revista *Scientific American* en noviembre de 1986, se intenta dar una explicación, en términos políticos, de por qué la Santa Inquisición juzgó de manera tan aparatosa a Galileo. La Europa de principios del siglo XVII se debatía entre la Reforma y la Contrarreforma, la Guerra de los Treinta Años, las alianzas de España, Inglaterra y Francia y, en medio de todo ello, el gran poder temporal del papado. Según los autores del artículo, Galileo fue condenado a desmentir sus ideas heliocéntricas como un gesto simbólico de buena voluntad del papa Urbano VIII, destinado a mitigar la hostilidad española, que no veía con buenos ojos su política profrancesa. La causa del proceso de Galileo podría explicarse, más o menos, de la manera que sigue:

En 1632, Galileo publica en Florencia (y en italiano, que el gran público entendía) uno de sus dos diálogos maestros... *Sopra i due Massimi Sistemi del Mondo tolemaico, e Copernicano; proponendo indeterminatamente le ragioni Filosofiche, e Naturali tanto per l'una, quanto per l'altra parte*, como se dice en la famosa portada del gran libro galileano, adornada equívocamente por tres delfines. En el Diálogo, dos personas discuten frente a un tercero, hombre de la calle; uno adopta el punto de vista ptolemaico y el otro se adhiere a Copérnico. El primero, Simplicio, como su nombre lo indica, aparece

como dogmático y poco inteligente.

Ya que el papa Urbano VIII sabía de las inclinaciones de Galileo —pues éste le había dedicado en 1623 su libro *II Saggiatore* donde defiende el sistema de Copérnico—, le había dado instrucciones de que en su nuevo libro no eligiera entre los dos sistemas del mundo. Tal intento de obediencia a la autoridad papal se trasluce en la parte final del largo título del Diálogo. Sin embargo, los enemigos de Galileo, ya numerosos y muy influyentes para entonces, convencieron al Papa de que Simplicio no era más que la caricatura del Primado. Galileo, tenido hasta ese momento en gran estima por Urbano VIII, cae de la gracia papal.

Los tiempos políticos, por otro lado, parecen haber sido contrarios a la suerte de Galileo. En 1632, el Cardenal Gaspar Borgia, embajador español ante la Santa Sede, ataca abiertamente al Papa en el Colegio Cardenalicio. La presión española busca que el Papa disuada a Francia de su alianza con Gustavo Adolfo, el rey protestante de Suecia. Todo ello ponía en peligro al Sacro Imperio Romano y al catolicismo en Alemania. Empero, el Papa no podía enemistarse con la católica Francia. Le quedaba, pues, el gesto simbólico de sacrificar públicamente a alguien notoriamente profrancés, y herético por añadidura. El monje apóstata dominico, Tomás Campanella, era la más obvia elección. Campanella, sin embargo, sabía demasiado, por lo que habría de buscarse algún otro chivo expiatorio. Para su mala fortuna, Galileo acababa de perder la gracia papal, al poner en boca del simple Simplicio argumentos caros a Urbano VIII.

Culmina así el proceso de Galileo. El 22 de junio de 1633, la Congregación del Santo Oficio decreta que Galileo es culpable de haber puesto sin autorización el *imprimatur*, y de haber afirmado que la Tierra se mueve. Galileo abjura y rechaza las ideas copernicanas; ya septuagenario se ve condenado al silencio y a la penitencia de recitar, cada semana durante tres años, los salmos. Antes de morir ciego en 1642, en Arcetri, cerca de Florencia, completa con el auxilio de sus discípulos Viviani y Torricelli su otro gran Diálogo: *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno à due nuove scienze*, que fue publicado en Holanda en 1636. Así empieza la mecánica y con ella la ciencia física, tal y como hoy la concebimos.

Antes de relatar la historia de Galileo el físico, cedo ahora la palabra a Pico, un experto en el barroco italiano.



VIII. UN CUENTO DE LA CIUDAD ETERNA: LAS ABEJAS Y EL CINCEL

EXCEPTO por la frugal iglesia que llevaba su nombre, santa Bibiana había pasado a ser una de las tantísimas vírgenes que murieron por la fe y la cristiandad bajo la fuerza implacable del látigo, del fuego y del martirio. Sin embargo, por mera casualidad, al cambiar las baldosas del piso de la iglesita de Santa Bibiana, unos albañiles encontraron intacto el esqueleto de la santa.

Esto ocurría por 1624, y Urbano VIII, la figura central de la vida de Roma en ese momento, escribió un poema conmemorativo refiriéndose al sacro hallazgo y mandó llamar a un nuevo Miguel Angel para hacerle su primer encargo pontificio: Gian Lorenzo Bernini había de esculpir una imagen de santa Bibiana para embellecer el pequeño templo que lleva su nombre.

Urbano VIII, al fungir como Papa desde el año anterior, había recibido un conflictivo pero codiciado cargo. El papado había sentido los golpes luteranos de la joven iglesia protestante que florecía en Alemania y su debilidad era patente. Se habían oído en los corredores del Vaticano las amenazas de la creciente influencia de los Hapsburgo, y el joven arzobispo Maffeo Barberini, ahora con la triple tiara y tenedor de las llaves de San Pedro, lucharía acérrimamente construyendo la oscura leyenda de la Contrarreforma.

Hallazgos de santos y apóstoles en las calles de Roma eran frecuentes, pero Urbano VIII hizo de estos descubrimientos lazos fuertísimos con la Roma ferviente y cristiana de la Antigüedad. Santa Bibiana, como santa Cecilia, santa Práxedes o santa Elena, serviría como bandera de la Contrarreforma, y Gian Lorenzo Bernini como el paladín que sostendría sin saberlo ese estandarte.

Urbano VIII se abstraía y escribía poesía. Reflexionaba sobre el blasón de su familia, que llevaba tres abejas y un gran sol. Como un hombre progresista, era laborioso como esos insectos, y ponía al astro rey en el centro de todo, como lo proclamaba un paisano suyo, Galileo Galilei, desde la blanca ciudad de Pisa. Gustaba de los vericuetos de la plática y de la política, y sobre todo amaba el arte. Quiso hacer de Bernini una creación suya y, alrededor del Papa y del escultor se tejó una red de admiración y cariño recíprocos.

Mientras Bernini trataba de esclarecer el problema de la intersección de las dos naves de la Basílica de san Pedro, que ya había sido terminada y bendecida poco antes por su amigo el Papa, se gestaban en las oficinas papales serios problemas: la Guerra de los Treinta Años se convertía en un juego insulso de ajedrez y Richelieu, habiendo simpatizado con Urbano VIII, tenía las mejores posiciones en el tablero, haciendo risibles las de los protestantes alemanes.

Existe en Roma una manera críptica y fantástica de hacer resonar la *vox populi*, que son los pasquines. "Paschino" era una antigua y desfigurada estatua alrededor de la cual se pegaban con grandes brochazos de engrudo mordientes críticas anónimas. Bernini había solucionado su arquitectónico problema proyectando un tabernáculo inmenso, en bronce, llamado "Baldaquino", que cubriera de egregia manera el altar mayor de la gran basílica. Al mismo tiempo, Urbano VIII, volviéndose totalmente reaccionario y opuesto a las ideas copérnicas, condenaba a Galileo al ostracismo, calmando así la pasión mojigata del acusador del astrónomo, el cardenal Roberto Bellarmino. No hay duda de por qué apareció el famoso pasquín:

quod non fecerunt barbari fecerunt Barberini

(lo que no hicieron los bárbaros, lo hicieron los Barberini), pues el Papa había ordenado desmontar las coberturas de bronce de edad inmemorial que adornaban el pórtico del Panteón, para poder vaciar las enormes columnas salomónicas del Baldaquino, y había mandado a uno de los grandes científicos del siglo a un forzado silencio.

Bernini siguió siendo el representante nepótico de esa fe teñida en política de los mil seiscientos. Esculpiría un intenso retrato para la tumba de Bellarmino y diseñaría un magnífico monumento para su amigo el Papa, decorado con grandes abejas de mármol. Adornaría la oblonga Piazza Barberini con la fuente inolvidable del Tritón, sin que nadie cuestionara el por qué de los cuatro delfines que servían de base a la fuente; algunos documentos de Galileo, entre ellos el *Diálogo de los dos sistemas*, habían sido decorados con un emblema representando tres delfines, el símbolo del hermetismo, un ligero eco de las llamas que consumieron a Giordano Bruno años antes. Bellarmino había utilizado esto como poderosa arma contra el astrónomo pisano. Irónicamente, Bernini coronaría su Baldaquino con una gran esfera terráquea y un crucifijo, colocando alrededor de manera ornamental pero significativa, giratorios soles de los Barberini que aún hoy siguen estáticos alrededor de la Tierra.



IX. DOS MAESTROS DE LOS EXPERIMENTOS PENSADOS

LA HISTORIA de Galileo, el físico, es para la ciencia, si cabe, más importante aun que aquella de Galileo, el astrónomo. Comienza casi por accidente en 1581, cuando descubre la isocronía del péndulo: el periodo de éste no depende de la amplitud de su oscilación.

La historia continúa en 1586, cuando publica el folleto donde describe su invento de la balanza hidrostática. Con ello, Galileo comienza a ser conocido en el mundo escolástico. Al mismo tiempo, presenta a la Academia Florentina dos trabajos que buscan aclarar dónde se localiza y cuál es el tamaño del infierno de Dante. Gran paradoja: ¡el más grande físico del diecisiete ocupado en esos menesteres!

Galileo escribe su obra maestra también en forma de diálogo. Salvacio, Sagredo y Simplicio charlan durante cuatro días sobre dos nuevas ciencias, aquella que se ocupa de la resistencia de los materiales y la que trata del movimiento, incluido el de los proyectiles. En el diálogo, el sabio Salvacio explica pacientemente, con la ayuda de pruebas geométricas, de experimentos reales y pensados, las ideas que habrían de sentar las bases de la mecánica.

Muchos de los razonamientos de Galileo son impecables y devastadores. No podría dejarse sin mencionar aquel donde demuestra que los cuerpos pesados caen con la misma aceleración que los ligeros —afirmación que, según cuenta una más de las leyendas galileanas, él comprobó al dejar caer balas de cañón desde lo alto de la torre inclinada en su Pisa natal—. Galileo nos dice: Supóngase, si seguimos a Aristóteles, que los cuerpos pesados caen más rápidamente que los ligeros. Tómese entonces una piedra *A* y divídase en dos partes iguales *B* y *C*. Como *D* y *C* pesan lo mismo, caen simultáneamente y juntas, y siempre lo hacen más despacio que *A*. Las partes de la piedra llegan al suelo después que la misma piedra, conclusión que es ¡un absurdo! También nos hace ver Galileo en sus *Discorsi* que esferas que rueden desde el reposo no pueden alcanzar alturas mayores o menores que aquélla desde la cual se les ha soltado. De otra forma, podríamos construir una máquina de movimiento perpetuo, que él consideraba absurda. Con este solo ingrediente, llegó a una conclusión sorprendente: los cuerpos en su estado natural se mueven con velocidad constante.

Empero, Galileo no se dejó llevar por su mente poderosa, capaz de concebir tan ingeniosos argumentos. Se da cuenta, y lo repite innumerables veces en su Diálogo, de la importancia de realizar experimentos reales, de medir tiempos y distancias. Aquéllos, en particular, son difíciles de medir con precisión. Primero, Galileo empleó su propio pulso como reloj y pronto se dio cuenta de la gran incertidumbre con que medía, sobre todo, intervalos cortos de tiempo. Por ello empezó a utilizar la clepsidra, el reloj de agua. Al inicio de su experimento, de su observación controlada, abría la llave de un recipiente lleno de agua. Colectaba el líquido en otro recipiente y, al final del proceso que observaba, clausuraba la llave. Al pesar la cantidad de agua que había fluido, podía Galileo comparar intervalos de tiempo con no mala precisión. Así pudo comprobar, entre otras cosas, que la distancia recorrida por cuerpos uniformemente acelerados era proporcional al cuadrado del tiempo transcurrido.

En el cuarto día de diálogos, Salvacio explica el movimiento de los proyectiles. Ya que Simplicio llega a tiempo, empieza Salvacio con su primer teorema: "un proyectil que es llevado por un movimiento horizontal compuesto con un movimiento vertical naturalmente acelerado describe una trayectoria que es una semiparábola." Sagredo pide un paso lento, pues según él no ha llegado muy lejos en el estudio de Apolonio, y Simplicio afirma estar dispuesto a aceptar los teoremas de Salvacio, a tener fe en ellos, aun sin comprenderlos plenamente.

En cualquier caso, ahí quedan los descubrimientos de Galileo sobre el movimiento uniforme y acelerado de los cuerpos, la composición de dos velocidades y el tiro parabólico. Veamos ahora cómo todo ello evoluciona bajo el enorme impulso de la muy poderosa mente de ese otro gran maestro de los experimentos pensados.

Newton imaginó en la cima de una montaña, a un gigante que podía lanzar piedras con velocidades siempre crecientes. Primero el gigante arroja una piedra que cae al pie de la montaña; luego imprime a la piedra una velocidad mayor hasta que el ímpetu inicial es tan grande que Newton imagina a la piedra llegar al otro lado del océano.

El gigante es capaz de hazañas aún mayores: da tal empujón inicial a la piedra que ésta no sólo atraviesa el océano, sino que sigue en su viaje alrededor de la Tierra y regresa a la montaña de la cual partió. Así, el gigante de Newton ha puesto en órbita un satélite. Convirtió un objeto terrestre, una simple piedra, en un cuerpo celeste, en una luna de nuestro planeta.

La hazaña intelectual de Newton es mayor incluso que la de su gigante: de un solo golpe logra la primera gran síntesis en la historia de la física, al unir la mecánica celeste con la terrestre. Aristóteles, el gran sabio griego, empieza a quedar atrás...



X. LAS LEYES DE NEWTON

ANTES de discutir matemáticamente el movimiento de los cuerpos en el Libro Primero de sus *Principia*, Newton presenta un conjunto de definiciones y los axiomas o leyes del movimiento. Entre las primeras, explica lo que son la cantidad de materia y de movimiento y la *vis incita*, o inercia, "que es una fuerza innata de la materia por la cual todo cuerpo continúa en su estado presente, sea éste de reposo o de movimiento uniforme hacia adelante en una línea recta". Define también la fuerza como "una acción ejercida sobre el cuerpo para cambiar su estado", así como algunas propiedades de la fuerza centrípeta, aquella que empuja los cuerpos hacia un centro. Sigue luego el famoso escolio, donde Newton introduce las ideas de tiempo y espacio absolutos: "el tiempo absoluto, verdadero, matemático, por su propia naturaleza fluye por igual sin relación con nada externo"; "el espacio absoluto, por su propia naturaleza, sin relación con nada externo, permanece siempre igual e inmóvil."

En cuanto a los axiomas o leyes de movimiento, Newton escribió en los *Principia*:

LEY I

Todo cuerpo continua en su estado de reposo o de movimiento uniforme en una línea recta a menos que se vea compelido a cambiar ese estado por fuerzas que se le impriman.

Los proyectiles continúan en su movimiento, mientras no los retarde la resistencia del aire, o los jale hacia abajo la fuerza de gravedad. Un trompo cuyas partes, debido a su cohesión, son empujadas continuamente hacia fuera del movimiento rectilíneo, no cesa en su rotación, en tanto no sea retardado por el aire. Los cuerpos más grandes de los planetas y los cometas, que encuentran menos resistencia en espacios más libres, preservan su movimiento tanto progresivo como circular durante tiempos más largos.

LEY II

El cambio en el movimiento es proporcional a la fuerza motriz que se le imprime; y se hace en la dirección de la línea recta en la cual se imprime la fuerza.

La fuerza genera un movimiento, una doble fuerza generará el doble de movimiento, sin importar que esa fuerza se imprima totalmente, o en forma gradual y progresiva. Y este movimiento (que se dirige siempre igual que la fuerza que lo genera), si el cuerpo se moviera ya, se añade o subtrae del movimiento anterior, de acuerdo a que los dos se compongan directamente o vayan directamente contrarios uno al otro; o se unen oblicuamente, cuando son oblicuos, para producir un nuevo movimiento compuesto de ambos.

LEY III

A toda acción se opone siempre una reacción igual; o las acciones mutuas de un cuerpo sobre otro son siempre iguales y dirigidas a partes contrarias.

Lo que sea que jala o presiona a otro es jalado o presionado por ese otro. Si se presiona una piedra con el dedo, éste es también presionado por la piedra. Si un caballo jala una piedra atada a una cuerda, el caballo (si se me permite decirlo así) será igualmente jalado hacia la

piedra; porque la cuerda tensa, por su tendencia misma a relajarse o desdoblarse, jalará al caballo tanto hacia la piedra cuanto ésta lo hace hacia el caballo, y obstruirá el progreso del uno tanto como avanza el de la otra. Si un cuerpo incide sobre otro, y por su fuerza cambia el movimiento de éste, este cuerpo también (a causa de la igualdad de la presión mutua) sufrirá un cambio igual, en su propio movimiento, hacia la parte contraria. Los cambios causados por estas acciones son iguales, no en las velocidades sino en los movimientos de los cuerpos; esto es, si los cuerpos no se ven obstruidos por otros impedimentos. Porque, a causa de que los movimientos se cambien por igual, los cambios en las velocidades hacia partes contrarias son inversamente proporcionales a los cuerpos.

Nuestra transcripción de lo que Newton escribió —que, con seguridad, poco favorece a su estilo literario, propio de los escritos científicos en latín del siglo XVII— resalta la pregunta que muchos nos hemos hecho: ¿No es, acaso, la Ley I un caso particular de la Ley II? A primera vista, todo parece indicarlo así. En efecto, si la fuerza es cero, el cambio en el movimiento (que en la expresión de Newton es el ímpetu, igual al producto de la masa de la partícula por su velocidad) es nulo; sin fuerza, la segunda ley parece reducirse a la primera ley. La Ley I, en apariencia, está contenida en la Ley II. Sin embargo, esto no es así.

Newton mismo dedujo de sus leyes el resultado siguiente: "Los movimientos de los cuerpos contenidos en un espacio dado son los mismos, tanto si el espacio está en reposo, como si se mueve hacia adelante de manera uniforme sobre una línea recta, sin movimiento circular." Esta curiosa conclusión es un principio muy general de la física, llamado principio de relatividad galileano o newtoniano, según los gustos personales. Veámoslo ahora desde la perspectiva de la física actual.

Empecemos por una definición: la de sistema de referencia inercial. Se entiende por sistema de referencia el conjunto de relojes para medir tiempos y de reglas para medir longitudes, que permiten localizar un suceso. El sistema (o marco) de referencia es inercial si en él una partícula libre de toda influencia externa se mueve con una velocidad constante. En particular, si esta velocidad es nula, el puntomasa permanecerá siempre en reposo. A primera vista, un sistema inercial no podría existir en la naturaleza descrita por la física, pues sería imposible comprobar experimentalmente que una partícula se hallase exenta de toda interacción. Para ello, sin duda la masa debería hallarse infinitamente alejada de todo objeto. No se podría, en consecuencia, ponerla en contacto con los aparatos de medida para realizar experimentos. ¡Y esto contradice el espíritu que Galileo imprimió a la física como ciencia experimental!

Paradójicamente, es este mismo carácter experimental de la física el que abre un resquicio que permite hallar sistemas inerciales en la naturaleza; se supera así la contradicción arriba mencionada. En efecto, al hacer una observación controlada —un experimento—, los científicos siempre cometen errores. No existe aparato de medida que sea perfecto y con el cual puedan obtenerse datos con una precisión infinita. En el caso que nos ocupa, se debe medir la velocidad de un cuerpo ajeno a otros —cuerpo que llamaremos partícula testigo— y verificar si esa velocidad es o no constante. De experiencias previas con su aparato, el físico conoce la magnitud del error que comete. Entonces, si los resultados de las mediciones de la velocidad dan valores cercanos entre sí, con diferencias entre los distintos resultados que sean menores a ese error, el experimentador sólo puede concluir que la velocidad es constante: si hubiera un cambio en la velocidad, es decir, una aceleración, él no estaría capacitado para detectarlo. En consecuencia, para contar con un sistema inercial es necesario hallar un marco de referencia tal que la influencia externa sobre la partícula testigo produzca un cambio en su velocidad menor a la incertidumbre —que siempre existe— en la medición. Muchos hemos visto en la televisión al astronauta en órbita alrededor de la Tierra soltar su cepillo de dientes y hemos visto como éste flota, se queda en reposo respecto a la cápsula espacial. El satélite artificial que órbita libremente alrededor de nuestro planeta es, localmente, un buen sistema inercial.

Postulemos, pues, que existe en la naturaleza un sistema de referencia inercial. Si el tiempo fuera absoluto,

como Newton lo quería, fluiría por igual en todos los marcos de referencia inerciales. Entonces, la regla para componer velocidades en la mecánica clásica nos indica que si existe un sistema de referencia inercial existe una infinidad de ellos. En efecto, si u es la velocidad de un cuerpo respecto a un marco de referencia, y u' respecto a otro igualmente inercial que se mueve respecto al anterior con velocidad V , tenemos que $u = u' + V$. Esta regla ha sido intuitivamente comprobada por todo aquel que por tener prisa haya subido corriendo por una escalera automática: su velocidad respecto a la escalera se suma a la de ésta respecto al edificio, por lo cual la persona se mueve más rápidamente y alcanza el piso superior en un tiempo menor.

Podemos ahora volver a enunciar el principio de relatividad, postulado de aplicación muy general que trasciende incluso los límites de la mecánica: todas las leyes de la física son las mismas en todos los marcos inerciales. O, puesto de manera negativa, no existe experimento alguno que pueda distinguir un sistema inercial de referencia respecto a otro marco inercial cualquiera. Como veremos luego, Einstein hizo suyo este principio —que se deduce de innumerables experimentos— pero sus consecuencias fueron otras, pues abandonó el concepto newtoniano de tiempo absoluto.

Ahora ya podemos expresar la primera ley de Newton en una forma más precisa y que consta de dos partes: en la primera, postulamos que existe un sistema inercial y, en la segunda, que las leyes de la mecánica son las mismas en todos los sistemas inerciales. No en balde estos dos postulados forman la primera ley. Entre las leyes de Newton ésta es la de aplicabilidad más general, válida no sólo en el mundo cotidiano de la mecánica newtoniana, sino también para aquellos objetos microscópicos regidos por la física cuántica y para aquellos cuerpos muy veloces sujetos a las leyes einstenianas.



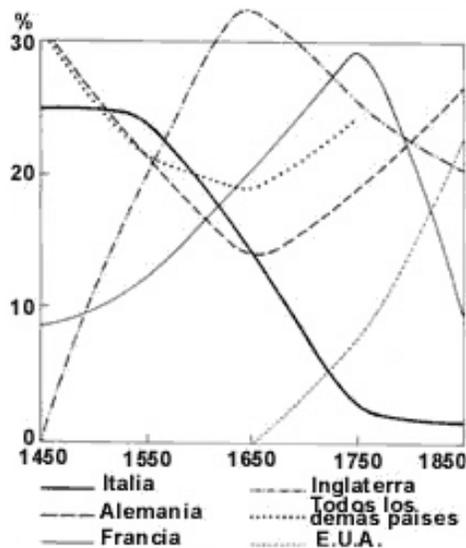
XI. EVOLUCIÓN DE LA MECÁNICA

NEWTON muere en Londres, el 20 de marzo de 1727. Sus últimos años son raros: director de la Casa de Moneda inglesa, miembro del Parlamento y autor de algunos extraños escritos que no permiten entrever a uno de los mayores hombres de ciencia en la cultura humana. Luego de su muerte, la ciencia en Inglaterra, sobre todo en lo que a las matemáticas y a la mecánica se refiere, decae y surge un grupo impresionante de científicos franceses.

Lo anterior se puede apreciar claramente en la gráfica que presento a continuación y que construí de la siguiente manera: Existen algunos libros que reúnen breves biografías de los científicos más célebres en diferentes épocas. Entre ellos, el libro escrito por Isaac Asimov, *Biographical Encyclopedia of Science and Technology*, es muy cómodo y útil. En él encontramos a los 1 195 científicos y tecnólogos que Asimov considera como los más importantes desde la Antigüedad.

Ignoro cuál haya sido el criterio de selección que empleó Asimov. Sin embargo, puedo decir que si bien no son todos los que están ni están todos los que son, las excepciones que algunos colegas y yo hemos encontrado en las ramas de física y matemáticas son escasas. Por dar ejemplos: ni Jacobi ni Eötvös aparecen y, en cambio, se da un papel exagerado a algunos tecnólogos nacidos en Estados Unidos.

Aceptando el criterio de Asimov para incluir o excluir algún nombre, podemos clasificar a los biografiados según su país de origen y de acuerdo a su fecha de nacimiento. Con ellos hemos construido la gráfica de la siguiente página, que es interesante cualitativamente.



Por la gráfica vemos que, en sus orígenes, la ciencia moderna —europea, por excelencia— se concentra en Italia y en Alemania. En ambos países decrece el número de científicos en el siglo XVII. El decaimiento continúa en Italia hasta el final del XIX, pero en Alemania se da un gran resurgimiento, que hace de este último país la primera potencia científica del siglo pasado y principios del actual. Inglaterra, por su parte, alcanza su máximo nivel relativo en la época de la publicación de los *Principia* y decae cuantitativamente —aunque no cualitativamente— de ahí en adelante. El caso francés, por otro lado, es muy interesante: el número de grandes científicos nacidos en Francia ocupa hasta 1900 uno de los cinco primeros lugares y presenta un fuerte máximo en el siglo XVIII. Ésta es la época de los enciclopedistas y del desarrollo matemático de la mecánica que habían cimentado Galileo y Newton.

Entre los ilustres científicos franceses del dieciocho está Jean d'Alembert, quien postuló el principio que hoy lleva su nombre, estudió la teoría gravitacional —en particular, la precesión de los equinoccios— y fue el padrino intelectual de Lagrange y Laplace. Fuera del ámbito científico, d'Alembert es tal vez más

famoso por haber sido el autor de la Introducción de la gran Enciclopedia de Diderot. Lagrange, piamontés nacido en 1736, fundó la Academia de Ciencias de Turín, inventó casi al mismo tiempo que el matemático suizo Euler el cálculo de variaciones y utilizó su talento matemático para sistematizar la mecánica de Galileo y Newton. Encontró la ecuación —que lleva su nombre— que permite plantear de manera muy general los problemas mecánicos. Su obra fundamental es la *Mecanique Analytique*, donde hace gala de lo analítico y prescinde de todo argumento geométrico, al grado de que el libro no contiene figura, gráfica o esquema alguno.

Cuentan que Napoleón, al hojear el *Traité de Mécanique Céleste* escrito por el marqués de Laplace, le comentó al autor que no encontraba ninguna mención a Dios en todo el tratado. Laplace, soberbio, le respondió que él no necesitaba de esa hipótesis. Cuando esto llegó a oídos de Lagrange, el otro gran mecánico teórico contemporáneo de Laplace, se dice que aquél comentó: "¡Ah! pero de cualquier modo ésa es una bella hipótesis. Explica tantas cosas." Trabajó primero Laplace con Lavoisier, el padre de la química, y juntos iniciaron lo que hoy llamamos la termoquímica. Luego se dedicó a la gravitación y estudió la estabilidad del sistema solar, probando con Lagrange que las órbitas planetarias casi no pueden variar, que permanecen estables. Ya sexagenario, escribió otro tratado, ahora sobre la teoría de la probabilidad, con lo cual esta importante rama de las matemáticas empezó a tomar la forma que hoy tiene.

Muchos otros sabios franceses contribuyeron al avance de la física y la química en estos siglos. Ya mencionamos a Lavoisier, pero también están Coulomb y Ampère, quienes lograron avances fundamentales en la electricidad y el magnetismo. En el campo de la mecánica y la gravitación, otras figuras, si bien menores, son Foucault, Clairaut, Coriolis, Arago y Leverrier, quien predijo por mero cálculo la existencia de un nuevo planeta, Neptuno, lo que constituyó el logro más espectacular de la teoría newtoniana y que la llevó más allá de toda duda.

Entre los científicos del resto de Europa muchos otros hombres de ciencia merecen una mención por sus notables trabajos en el campo de la mecánica: ya mencionamos al suizo Euler, el matemático más prolífico de la historia, quien avanzó sobre todo en la mecánica de los medios continuos; también Jacobi, Bessel y Hamilton contribuyeron de manera importante. Sin embargo, desde el punto de vista de la gravitación nos interesan en particular Cavendish y Eötvös, quienes, con la balanza de torsión, realizaron dos experimentos fundamentales para el relato que estamos realizando.



XII. UN APARATO SIMPLE PERO ÚTIL

EN EL viejo Laboratorio Palmer de la Universidad de Princeton había en los sesentas un salón de seminarios donde todos los días, en punto de las cuatro de la tarde, se reunían muchos físicos del departamento a tomar café y galletas. Por las noches, en ese mismo salón, tenían lugar las terribles *bull sessions*, donde se discutían sin límite de tiempo los avances recientes de la física. A veces la sesión se prolongaba hasta bien entrada la noche; a las diez, e incluso a las once de la noche salíamos del viejo salón de seminarios, a enterarnos de la primera nevada o a sufrir otras inclemencias del clima, pero siempre conscientes de estar en la frontera de un campo de la física. En el salón de marras había, además, una vitrina donde se apiñaban aparatos científicos que habían sido utilizados por físicos princetonianos para contribuir al desarrollo de su ciencia. Estaban por ahí los usados por Henry el siglo pasado, cuando fue el primer norteamericano que experimentó con electroimanes para, de hecho, inventar el telégrafo. También había un aparato usado no hacía mucho tiempo por Robert Dicke al realizar uno de los experimentos más precisos de todos los tiempos.

El aparato de Dicke no es sino una versión, moderna y refinada, de la balanza de torsión usada por Coulomb y por Cavendish en el siglo XVIII, y más tarde por Eötvös en 1890. Con este aparato Coulomb encontró cuál es la fuerza que una carga eléctrica ejerce sobre otra; Cavendish confirmó la ley de la gravitación universal, propuesta cien años antes por Newton, y Eötvös estableció la igualdad de la masa inercial y gravitacional de una partícula, que es uno de los principios básicos de la teoría general de la relatividad de Einstein. La balanza de torsión es pues uno de esos aparatos simples, pero muy precisos, que han tenido un papel crucial en la historia de la física, incluyendo la de tiempos recientes.

Es interesante discutir este arreglo experimental que, como vemos, ha desempeñado un papel sobresaliente en la ciencia. Con ello pretendemos ilustrar dos cosas muy importantes. La primera es la unidad en la física, pues en muy diversos campos de esta ciencia se emplean las mismas técnicas experimentales y se manejan los mismos conceptos. La segunda es igualmente interesante: para obtener resultados científicos cruciales no siempre es indispensable contar con cuantiosas sumas de dinero para montar enormes y costosos laboratorios; el uso ingenioso de un aparato relativamente simple puede bastar.

El aparato es sumamente sencillo. Básicamente consiste de un soporte que se encuentra suspendido de un alambre, el cual a su vez está unido a un micrómetro de torsión. En este soporte se suspenden las muestras apropiadas, dependiendo del experimento. El aparato completo se encuentra encerrado en un recipiente con el fin de que no lo afecten las corrientes de aire. Con la balanza de torsión se pueden hacer mediciones cuantitativas de fuerzas de atracción o repulsión entre las muestras e investigar su dependencia con las distancias entre los objetos que las ejercen.

El primero que utilizó la balanza de torsión fue Charles Coulomb en 1784. Con ella investigó la naturaleza de las fuerzas electrostáticas. En una primera serie de experimentos encontró que la fuerza medida con el aparato es proporcional al ángulo de torcedura θ , y que la constante de proporcionalidad depende de las características del alambre usado. En el segundo grupo de experimentos, Coulomb colocó en uno de los brazos del soporte un objeto con carga igual a $+q_1$, mientras que a una cierta distancia de él fijó otro objeto con carga igual a $+q_2$.

En este caso, entre q_1 y q_2 se establece una fuerza repulsiva F_{12} debido a que ambos cuerpos contienen carga del mismo signo. Esta fuerza hace girar el brazo horizontal de la balanza un ángulo θ . Si torcemos el alambre de suspensión podemos regresar la balanza a su posición original. Como se dijo antes, es posible calcular la magnitud de la fuerza entre las cargas a partir del ángulo de torcedura θ . Por otra parte, si variamos la distancia de separación entre las cargas se puede obtener la dependencia entre la fuerza F_{12} y la distancia de separación r_{12} . Una gráfica de F_{12} contra la distancia de separación indica que, para una amplia gama de distancias, la fuerza es inversamente proporcional al cuadrado de r_{12} y aumenta a medida

que se acercan las cargas.

Coulomb realizó más experimentos, sobre todo con cuerpos conductores, y fue capaz de dar una expresión completa de la fuerza en términos del estado de electrificación de los objetos y de la distancia de separación entre ellos. Sin embargo, nosotros no nos detendremos en este punto debido a que deseamos hacer una conexión entre sus resultados y los obtenidos por Cavendish.

Cuando Lord Cavendish realizó sus experimentos en 1798, hacía más de cien años que Newton había establecido la ley de gravitación universal. Los experimentos de Cavendish con una balanza de torsión fueron semejantes a los realizados por Coulomb, pero en vez de cuerpos cargados utilizó masas. Su primera meta fue la investigación experimental de la ley de la gravitación universal. Como ya vimos, tal ley afirma que la fuerza entre dos objetos masivos separados una cierta distancia es directamente proporcional al producto de sus masas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que los separa; esto es, $F_{12} = Gm_1m_2/r^2_{12}$. La constante de proporcionalidad G , conocida como constante gravitacional, fue determinada por Newton a partir de observaciones astronómicas, pero hasta Cavendish no se había hecho una medida de ella en un laboratorio terrestre. Tal medida se logró usando una balanza de torsión con la cual se determinó la fuerza gravitacional entre dos masas conocidas, separadas una distancia dada, en términos del ángulo de torcedura θ . Si en la ley de Newton se introducen el valor de la fuerza así obtenida, los valores de las masas y el cuadrado de la distancia de separación, se obtiene como resultado un valor definido de la constante gravitacional G , que es $G = 6.67 \times 10^{-8} \text{ din.cm}^2/\text{g}^2$, un valor pequeñísimo.

Cavendish tenía otra razón para llevar a cabo su experimento: si conocía el valor de la fuerza gravitacional entre dos masas dadas, podía determinar no sólo la masa de la Tierra, sino también su densidad promedio. Sus resultados indicaron que tal densidad es aproximadamente 5.48 veces mayor que la densidad del agua. Cuando un siglo antes Newton atacó este problema, tuvo que asignarle a la densidad terrestre un valor igual a cinco veces la densidad del agua, valor que, como vemos, no estaba muy alejado de la realidad.

Es interesante hacer notar que los dos experimentos descritos son semejantes, pese a que en el primero intervinieron las propiedades eléctricas de la materia mientras que en el segundo las cualidades mecánicas son las relevantes. Esto no es sorprendente si recordamos que las fuerzas electrostáticas y la gravitacional dependen exactamente de la misma manera de la distancia de separación.

Otra aplicación semejante e interesante de la balanza de torsión la encontramos en los experimentos de Eötvös en 1890. Sus experiencias se proyectaron para probar la equivalencia entre las masas inerciales m_I y gravitacional m_G de los objetos, entendiéndose por masa inercial la medida de la resistencia que presenta un cuerpo al cambio en su estado de movimiento, mientras que la masa gravitacional es considerada como medida de la atracción gravitatoria.

El principio utilizado en los experimentos se puede visualizar de la manera siguiente: considérese una masa que se encuentra sobre la superficie de la Tierra; tal masa va a estar sujeta a dos fuerzas: la gravitacional, dirigida hacia el centro de la Tierra, y la fuerza centrífuga, dirigida hacia afuera. Esta última fuerza es una consecuencia de la cotidiana rotación terrestre. En el experimento de Eötvös, la balanza que soportaba las dos masas estaba en equilibrio con respecto al observador y orientada de Este a Oeste. Cualquier pequeña diferencia en la proporcionalidad entre las fuerzas gravitacional e inercial se traduciría en una rotación de la balanza. Es decir, como la razón de las fuerzas depende de la razón de las masas gravitacional m_G a inercial m_I , la aparición de una rotación implicaría que m_G no sería igual a m_I . Eötvös demostró que, hasta una parte en mil millones y para todos los materiales usados, se cumplía que $m_G = m_I$. Esto es, si las masas fueran diferentes, lo serían a lo más en una milmillonésima parte.

Recientemente, Dicke ha repetido el experimento usando el aparato mencionado, con modificaciones importantes en el arreglo de Eötvös y utilizando aparatos y técnicas de medición muy refinados. Hasta el momento, sus resultados concuerdan con los de Eötvös y la igualdad entre m_G y m_I para las substancias

que ha utilizado está bien establecida en una parte en 10 billones.

Así, la balanza de torsión ha tenido un papel decisivo en la determinación de la fuerza electrostática entre cuerpos cargados —la ley de Coulomb— y en la investigación experimental de la ley de la gravitación universal de Newton, ambas leyes pilares de la física clásica. Además ha sido de gran importancia en la implantación de las teorías modernas de la gravitación, las cuales pregonan la igualdad de las masas gravitacional e inercial como uno de sus postulados básicos.



Indice

XIII. LUZ, ELECTROMAGNETISMO Y RELATIVIDAD

CON su balanza de torsión, Coulomb encontró la ley de las fuerzas entre cargas eléctricas. Otro físico francés, André Marie Ampère, continuó los estudios que había iniciado el científico danés Oersted sobre los efectos magnéticos de las cargas en movimiento. Encontró la ley de Ampère, la cual indica que una corriente eléctrica produce un campo magnético. Ya entrado el siglo XIX, quien tal vez haya sido el experimentador más hábil en la historia clásica de la física, Michael Faraday, inglés de nacimiento, encontró que un campo magnético variable induce una corriente eléctrica. Se unían así la electricidad y el magnetismo.

Vino entonces otro de aquellos grandes científicos capaces de lograr la síntesis. El escocés James Clerk Maxwell se da cuenta de que un campo eléctrico variable produce un campo magnético y formula las cuatro ecuaciones que hoy llevan su nombre, base de la teoría electromagnética. A la expresión matemática de las leyes de Coulomb, de Ampère y de Faraday, Maxwell agregó aquella que indica la inexistencia de la carga magnética: el monopolo magnético no existe.

De todo lo anterior tratamos ya con amplitud en el libro que abrió el tema de las grandes ilusiones de la física moderna, el volumen número 11 de la Ciencia desde México. Lo que aquí quisiera puntualizar, únicamente, es que las ecuaciones de Maxwell predicen la existencia de ondas electromagnéticas: un campo magnético y otro eléctrico que varían en el tiempo pueden mantenerse uno al otro y propagarse con una velocidad igual a la de la luz, y que llamaremos c .

El valor de c es enorme: 300 000 km/seg. El primero que se dio cuenta de que la luz se propaga con velocidad finita fue el mismo Galileo, quien incluso intentó medirla, según relata en uno de sus Diálogos. Posteriormente, muchos físicos la midieron y estudiaron cómo se propaga la luz. Se estableció que ésta sufre interferencia y se difracta; en otros términos, se vio claro que a la luz le ocurren fenómenos propios de una onda. Con ello se formuló la teoría ondulatoria para la luz, y se inventó un medio, el éter, en el cual la luz habría de propagarse.

Este medio, el éter, tenía propiedades fantásticas. Si se supusiera que es un medio elástico, sus cualidades serían asombrosas, nunca observadas en ningún otro material. Sin embargo, los físicos del siglo pasado se aferraron al concepto fantástico del éter, como soporte de la luz. Intentaron, incluso, medir la velocidad de la Tierra en su viaje respecto a este éter. Uno de esos experimentos, realizado por los físicos americanos Michelson y Morley a fines del siglo XIX, dio un resultado en definitiva nulo: No se podía detectar efecto alguno sobre la velocidad de la luz causado por, el movimiento de la Tierra respecto al éter.

Este y muchos otros análisis experimentales mostraban que había una gran persistencia del valor de c . En muy diversas condiciones, moviendo la fuente de luz o el colector de ésta, por ejemplo, la medida resultaba invariablemente ser 300 000 km/seg, siempre y cuando la luz se moviera en el vacío, fuera de los cuerpos materiales.

Las ecuaciones de Maxwell, sus ondas electromagnéticas y los experimentos ópticos representaban, cuando se inició el presente siglo, un gran enigma. Todos ellos implicaban un ataque brutal a la primera ley de Newton, al que hemos llamado el principio de relatividad de Galileo. Las ecuaciones de Maxwell, en particular, no eran invariantes cuando se pasaba de un sistema de referencia inercial a otro marco también inercial. No todos estos marcos inerciales resultaban igualmente válidos para hacer física, y esto resultaba molesto en extremo para los científicos. La electrodinámica y el principio de relatividad parecían no llevarse bien.

Muchos intentos fallidos se hicieron y varias explicaciones *ad hoc* propusieron los físicos para acoplar las ecuaciones de Maxwell con las de Newton. El gran edificio de la física clásica, con sus dos pilares fundamentales en desacuerdo, parecería venirse abajo. Surge entonces el gran pensador que revisaba

patentes en Berna. Albert Einstein se da cuenta de que la falla en los postulados newtonianos no estaba en el principio de relatividad sino en otro de los conceptos que Newton daba por sentados, el del "tiempo absoluto, verdadero, matemático, que por su propia naturaleza fluye por igual sin relación con nada externo". Este concepto, pensó llanamente Einstein, es incorrecto y da origen a las discrepancias entre la mecánica y el electromagnetismo.

Con un golpe de genio, Einstein cambió un absoluto por otro. Para neutralizar el ataque óptico sobre la relatividad, el gran físico alemán postuló que la velocidad de la luz, y no el tiempo, es absoluta. Nos aferramos, en primer lugar, al principio que tan lógico aparenta ser: todos los sistemas inerciales son igualmente válidos, las leyes de la naturaleza son invariantes al ir de un marco de referencia inercial a otro. Después, en segundo lugar, postulamos que no es posible transmitir información alguna de manera instantánea. En otras palabras, hacemos nuestro el concepto, en apariencia inocente pero también evidente, de que no existe señal alguna cuya velocidad sea infinita. Existe, pues, una velocidad máxima para enviar señales. Ésta es una ley de la naturaleza y, como tal, invariante frente a la transformación de un sistema de referencia inercial a otro, como lo pide el principio de relatividad de Galileo. Es decir, la velocidad máxima de transmisión de señales es la misma, independientemente de cuál sea el marco de referencia desde el cual se le mida. Ya que, experimentalmente, la máxima velocidad medida por físico alguno es la de la luz en el vacío, Einstein pensó que c es la velocidad máxima que ente material alguno pudiere alcanzar. En consecuencia, c representa un límite absoluto para cualquier velocidad y no depende de dónde se le mida. La velocidad c , y no el tiempo, es un absoluto.

Con este postulado, Einstein hizo suyos los experimentos sobre la luz y neutralizó el ataque óptico contra la relatividad. Pero también abolió el tiempo absoluto e hizo relativa la simultaneidad de dos eventos cualesquiera. Si dos fenómenos ocurren simultáneamente para un observador, pueden no serlo para otro que se mueva con velocidad rectilínea uniforme respecto al primero. Además, el tiempo y las coordenadas espaciales se mezclan al ir de un observador al otro. Ya el escenario de la física no es el espacio, por un lado, y el tiempo, por el otro. Las coordenadas espaciales y las temporales dejan de estar separadas y pueden mezclarse entre sí, ligadas por la velocidad absoluta c de la luz. La composición de las velocidades \mathbf{v} y \mathbf{V} no sigue la regla de Galileo: $\mathbf{v} + \mathbf{V}$, que tan acendrada está en nuestra mente. Ahora, si \mathbf{V} es la velocidad relativa entre dos observadores, uno mide \mathbf{v} y otro \mathbf{v}^I , las velocidades \mathbf{v} y \mathbf{v}^I están ligadas por $\mathbf{v}^I = (\mathbf{v} + \mathbf{V}) / (1 + \mathbf{v}\mathbf{V}/c^2)$. Ello garantiza la invariancia de c , como velocidad máxima de cuerpo alguno.

La dinámica de Einstein es diferente a la de Newton. Ahora los eventos, que se especifican dando las coordenadas espaciales y el tiempo en que ocurren, tienen lugar en el espaciotiempo, espacio matemático de cuatro dimensiones. La energía, por su parte, resulta ser equivalente a la masa m , según la fórmula famosa:

$$E = mc^2,$$

que tantas veces se ha comprobado en los laboratorios de la física moderna. Por otro lado, la teoría gravitacional de Newton, con su acción a distancia implícita, no puede hacerse compatible con la relatividad einsteniana, pues lleva oculto el concepto de que una fuerza puede transmitirse de manera instantánea. La teoría gravitacional de Newton y la relatividad de Einstein chocan frontalmente. Sólo cuando c aparentara ser infinita, ambas teorías podrían ser compatibles. La mecánica newtoniana es pues un caso límite de la einsteniana, pero sólo válida cuando los cuerpos se mueven despacio respecto a la velocidad de la luz. Por ello, cuando \mathbf{v}/c no es despreciable, se debe buscar una nueva teoría de la gravitación. Eso es lo que Einstein hizo durante más de diez largos años, hasta llegar a construir la teoría relativista de la gravitación. Ese nuevo y bello marco conceptual se conoce como la teoría general de la relatividad.

Indice



XIV. LAS GEOMETRÍAS NO-EUCLIDIANAS

AL HABLAR de los sabios griegos, mencionamos que la geometría y las teorías físicas sobre la gravitación han evolucionado de la mano. El desarrollo de una de estas ramas de la ciencia influyó siempre sobre la otra. Esta afirmación es muy clara si nos referimos a la teoría general de la relatividad: las ideas de Einstein sobre la gravitación son profundamente geométricas. Como ya vimos en la nota histórica escrita por el propio Einstein, la presencia de una masa gravitacional altera la estructura del espaciotiempo, curvándolo. Por ello, para establecer sus ecuaciones del campo gravitatorio, Einstein empleó los conceptos de la geometría de espacios curvos, propuesta el siglo pasado por Riemann. La geometría riemanniana forma parte de lo que hoy se llama la geometría no-euclidiana, pedazo de las matemáticas cuya historia fascinante ahora relataremos.

Euclides resumió en sus *Elementos* lo que en su tiempo sabían los griegos sobre la geometría. Su tratado es, como los *Principia*, o los libros de Maxwell sobre la teoría electromagnética, o *El origen de las especies* de Darwin, un libro de síntesis, donde se recolectan los conocimientos de una ciencia y se relacionan hechos en apariencia desconexos. En su libro, Euclides formula las premisas fundamentales de la geometría, con el uso de postulados y axiomas. De éstos, el que habría de alcanzar una mayor notoriedad es el quinto postulado, que se refiere a la existencia de una línea paralela a otra, es decir, de dos líneas rectas que no se cortan. Según el postulado quinto, por un punto fuera de una recta sólo se puede trazar una paralela a esta última.

En el quinto postulado, que Euclides formuló de manera complicada, está implícito el concepto de *infinito*, y por ello desde tiempos muy remotos se trató de expresarlo de manera diferente para, de plano, eliminar el postulado y deducirlo de otros axiomas. En sus intentos, muchos matemáticos reemplazaron el postulado quinto por otras aseveraciones que luego buscaban demostrar. Un ejemplo de esas afirmaciones es: la suma de los ángulos internos de un triángulo es igual a 180° . Otro ejemplo lo dio el mismo Gauss, uno de los mayores matemáticos de la historia, quien sustituyó el quinto postulado de Euclides por otro supuesto: existen triángulos con áreas tan grandes como se quiera. Parece ser que el gran Gauss llegó a plantear correctamente la cuestión y, finalmente, decidió abandonar el postulado quinto. No se atrevió a publicar sus deducciones, tal vez por temor a las críticas que resultarían si alguien como él se desviaba de una verdad absoluta tan evidente.

Fue el joven matemático ruso Nikolai Lobachevski quien en 1826 finalmente se percató de que el quinto postulado no puede deducirse de las otras proposiciones fundamentales de la geometría y se atrevió a negar la "verdad evidente" de ese postulado de Euclides. Tomó como cierta la proposición contraria: por un punto fuera de una línea recta, se puede trazar no una, sino al menos dos líneas paralelas a ella. De ahí dedujo una larga serie de teoremas, sin llegar a contradicción alguna. Con su trabajo, Lobachevski enseñó no sólo que el postulado quinto es indemostrable sino algo aún más importante: desde un punto de vista estrictamente lógico, se pueden concebir varias geometrías: la de Euclides cede su lugar como verdad absoluta.

Como otros grandes avances en el conocimiento, las ideas de Lobachevski no fueron aceptadas de inmediato; ideas tan radicales, que chocaban con los prejuicios de casi todos los matemáticos, no habrían de anclarse fácilmente como parte de la ciencia. Sin embargo, Lobachevski defendió sus ideas, que ahí quedaron como la esencia de una gran revolución en la geometría. Igual que sucedió con otros grandes hitos en la ciencia —como ocurrió, por ejemplo, con el cálculo diferencial que inventaron casi al mismo tiempo Newton y Leibniz—, la idea de una geometría no-euclidiana surgió de muchos autores. Ya hemos mencionado al gran Gauss; también el matemático húngaro Janos Bolyai descubrió la imposibilidad de probar el quinto postulado y publicó sus resultados en un apéndice al tratado sobre geometría que escribió su padre en 1832, tres años después que Lobachevski. Además de Bolyai, los matemáticos alemanes Schweikart y Taurinus seguían también sendas parecidas. No obstante, el joven ruso llegó más lejos y por ello la nueva geometría lleva su nombre.

En el preciso instante en que se reemplaza el postulado quinto de Euclides por el de Lobachevski, las figuras geométricas que tanto ayudan para entender mejor la geometría elemental dejan de ser útiles. La hoja del cuaderno que usamos en la escuela secundaria es un plano euclidiano. En esa hoja plana es imposible construir esquemas a la Lobachevski. Para ello requeriríamos de una superficie en forma de corneta, que técnicamente se llama seudoesfera. Si en lugar de líneas rectas usamos las líneas más cortas en la seudoesfera —líneas que llamaremos geodésicas—, la geometría intrínseca de esa corneta coincide con la del plano a la Lobachevski, plano en que por un punto fuera de una recta puede trazarse *más* de una línea paralela a ella. En 1868, el geómetra italiano Beltrami descubrió lo que acabamos de mencionar y la actitud de los matemáticos cambió de pronto: de algo ficticio, la geometría no-euclidiana de Lobachevski se tornó en algo real.

En la geometría de Lobachevski se pueden probar muchos teoremas, que parecen extraños pues no son válidos en el plano euclidiano que nos es familiar. Basten algunos ejemplos para ser conscientes de cuán rara es la geometría no-euclidiana: Dos líneas paralelas se cortan en el punto del infinito, pero su distancia crece indefinidamente en la dirección contraria; si dos líneas tienen una perpendicular común, la distancia entre ellas se vuelve infinita al alejarnos de esa perpendicular en cualquier dirección; la suma de los ángulos internos de un triángulo es siempre menor que 180° y no puede haber triángulos con un área tan grande como se quiera; la circunferencia ya no vale 2π veces el radio, y el teorema de Pitágoras para triángulos rectángulos ha de ser modificado. Por otro lado, para regiones muy pequeñas del espacio, la geometría de Lobachevski se parece mucho a la de Euclides. Decimos que ésta es un caso límite de aquélla. La nueva teoría incluye a la antigua, representa un caso más general; nuestro conocimiento ha, pues, avanzado.

La década de los setentas del siglo pasado fue crucial para las nuevas ideas geométricas. Ya mencionamos que en 1868 Beltrami dio un ejemplo real de la geometría de Lobachevski al demostrar que la seudoesfera, intrínsecamente, cumple las condiciones no-euclidianas de esa nueva geometría. Sin embargo, el ejemplo del matemático italiano no es completo, pues superficies como la seudoesfera no pueden extenderse infinitamente en todas las direcciones sin que hallemos puntos singulares. Lo último no es cierto para el plano de Lobachevski y, por ello, la geometría intrínseca de la seudoesfera no es equivalente a la de todo el plano a la Lobachevski. En 1870, sin embargo, el matemático alemán Klein encontró otra forma de cumplir los postulados de esa geometría no-euclidiana. Más aún, Klein mismo propuso en 1872, durante una conferencia en la Universidad de Erlangen, lo que habría de llamarse el "Programa de Erlangen", en el que se resumían los avances geométricos recientes —la geometría proyectiva, la afín, por mencionar sólo dos de ellos— y se requería la investigación de las propiedades de las figuras geométricas bajo una transformación que podría ser arbitraria salvo que siempre llevara de un solo punto a otro solo punto del espacio. Surgen así muchas otras geometrías —la conforme, por ejemplo— y se abre el camino al estudio de los espacios geométricos abstractos. Ya no se limitaría nuestro análisis a las figuras en el plano, o en el espacio de tres dimensiones en que nos movemos; ahora podríamos pensar en muchas dimensiones y en variables no forzosamente espaciales. Así, por ejemplo, hablamos del espacio de las variables termodinámicas de un gas, que bien pueden ser más de tres, como la presión, el volumen, la temperatura y las diversas concentraciones de las sustancias que forman ese gas. En este espacio multidimensional también estudiamos propiedades geométricas, ahora desde un punto de vista más abstracto. Por otro lado, en la historia que relatamos, la de las ondas gravitacionales, será indispensable usar el espaciotiempo, que tiene cuatro dimensiones, como ya hemos visto.



XV. MÉTRICA Y CURVATURA

EL OTRO gran brinco en nuestra concepción de la geometría se dio en 1868, al ser publicados póstumamente las conferencias y los artículos de Georg Riemann. En ellos, el gran matemático alemán expone las ideas básicas de la que ahora conocemos como geometría riemanniana y que provee la base matemática de la teoría general de la relatividad. Aunque la geometría de Riemann puede llegar a ser complicada en extremo, sus ideas básicas son simples y profundas, como todos los grandes conceptos de la ciencia. Vamos a tratar de explicarlos sin ser formales, es decir, sin utilizar el formalismo matemático.

Nos proponemos medir la distancia entre dos puntos P_1 y P_2 cualesquiera de un plano. Para expresar esa distancia en términos de las coordenadas cartesianas (x_1, y_1) de P_1 y (x_2, y_2) de P_2 , usamos el teorema de Pitágoras. La distancia d_{12} está dada entonces por $d_{12}^2 = (x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2$, o bien

$$d_{12} = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}$$
, como puede fácilmente comprobarse haciendo un dibujito. Las fórmulas anteriores son válidas también cuando P_1 está muy cerca de P_2 , en su vecindad como dicen los matemáticos. En particular, podríamos dividir el segmento de recta P_1P_2 en un gran número de pequeños, pequeñísimos segmentos y luego obtener la distancia d_{12} sumando las distancias entre los extremos de esos segmentitos. Este es el enfoque que usaríamos en el cálculo diferencial e integral para obtener la distancia entre dos puntos. En el plano, la fórmula es la misma —obtenida del teorema de Pitágoras— para puntos distantes entre sí que para puntos infinitamente cercanos uno del otro.

Todo lo anterior suena muy razonable y, de hecho, forma parte del bagaje matemático de cualquier estudiante de la geometría elemental. Empero, analicemos un poco más los conceptos escondidos que hay detrás de nuestro simple cálculo de d_{12} . Primero, de manera implícita supusimos que la distancia entre dos puntos existe. Por ello decimos que nuestro plano de marras es un *espacio métrico*. La métrica es una regla definida para calcular la distancia de dos puntos vecinos en el espacio. En segundo lugar, medimos la distancia en el plano a lo largo de la línea recta que une P_1 con P_2 . Bien hubiéramos podido usar otra línea curva que pasara por los dos puntos. Sin embargo, elegimos la línea recta, porque es la que conduce a la *mínima* distancia que es d_{12} . A este tipo de líneas extremas se les llama geodésicas. En una superficie esférica, por ejemplo, los meridianos son geodésicas, pero los paralelos (con excepción del ecuador) no lo son. Vemos pues que calculamos la distancia en un espacio métrico a lo largo de una curva geodésica. Finalmente hemos visto, en el ejemplo del plano, que el teorema de Pitágoras se aplica para puntos distantes entre sí y también cuando los puntos se acercan mucho. La regla para medir distancias es la misma local que globalmente. Por esta última propiedad, al plano que consideramos se le llama *euclidiano*. Hablamos, pues, del plano como de un *espacio métrico euclidiano*.

Armados de tales conceptos matemáticos, planteémonos ahora el problema de calcular la distancia entre dos puntos P_1 y P_2 que no estén en un plano, sino en una superficie, como una esfera o una seudoesfera. El problema debe atacarse, claro está, sobre la superficie, sin salirse de ella, como si sólo este espacio en dos dimensiones existiera. Un agrimensor cualquiera hace intuitivamente lo anterior: Mide sus distancias sobre la superficie terrestre (que recuerda a la de una esfera) y no sale nunca de ella. Al hablar de distancias a lo largo de una superficie analizamos, por tanto, la geometría intrínseca de esta superficie. Suponemos, pues, que la seudoesfera o la esfera es un espacio métrico de dos dimensiones, como el plano que antes tratamos. Ya sabemos que el teorema de Pitágoras sólo es válido localmente en la seudoesfera y que globalmente falla. De hecho, la vecindad de un punto cualquiera de una superficie suave se parece mucho a su plano tangente. La diferencia entre ambas superficies es menor, mientras menor sea la vecindad considerada. Por eso el agrimensor usa las fórmulas de la geometría euclidiana al medir un pequeño terreno sobre la superficie terrestre: las diferencias entre la esfera y su plano tangente no alcanzan a notarse en sus medidas. La seudoesfera —cuya geometría es un ejemplo de la de Lobachevski, geometría no-euclidiana— es el caso de un espacio métrico no-euclidiano en lo global, pero euclidiano localmente. En

otras palabras, la métrica puede elegirse igual a la dada por el teorema de Pitágoras para calcular las distancias entre puntos muy cercanos entre sí, pero toma otra forma si se trata de obtener la distancia entre un punto P_1 y otro punto P_2 separados por una distancia finita. Un espacio métrico no-euclidiano, como lo es la seudoesfera, donde vale localmente el teorema de Pitágoras, es lo que en matemáticas se llama un *espacio riemanniano*. Desde luego, el espacio más simple de este tipo es un espacio euclidiano, pues es métrico y, al ser euclidiano en lo global, también lo es localmente.

Georg Riemann generalizó así la geometría de los griegos, aquella que Euclides sintetizó en sus *Elementos*. El gran matemático alemán logró establecer un criterio que nos permite saber qué tanto se aleja un espacio de lo euclidiano. La medida de cuán no-euclidiano es un espacio métrico cualquiera es su curvatura. Ella se define como una propiedad intrínseca del espacio que se estudie, y no se refiere a las propiedades de éste al hallarse embebido en un espacio más grande. La idea de curvatura que introdujo Riemann es la generalización del concepto intuitivo que tenemos de la curvatura de una superficie, que mide la desviación de la geometría intrínseca de esa superficie respecto a la geometría del plano.

Para entender la curvatura a la Riemann, pensemos primero en dos casos donde aparece la curvatura de las superficies, como la usaba Gauss. Imaginemos un punto O sobre la superficie curva y tracemos un pequeño triángulo de área A que contiene a O . Los lados del triángulo son geodésicas de la superficie y forman ángulos α , β y γ entre ellos.

Pues bien, la curvatura llamada gaussiana es igual en el punto O a la cantidad $K = (\alpha + \beta + \gamma - \pi)/A$, cuando el área A se hace muy, muy chiquita. Nótese que en un plano la suma de los ángulos internos de cualquier triángulo es igual a π (es decir, 180°); por lo tanto, en un plano la expresión anterior vale siempre cero: decimos por ello que el plano no es curvo, que su curvatura es nula.

La curvatura gaussiana K también ocurre en este otro caso: Tracemos un circulito de radio r , circunferencia l y con centro en O . Para definir este círculo, pensamos en todos aquellos puntos sobre la superficie que equidistan de O a lo largo de líneas geodésicas. La curvatura de Gauss, K , da también el límite al que tiende la diferencia entre l y $2\pi r$. La fórmula precisa es $2\pi r - l = (\pi r^3/3)K$ cuando r se acerca mucho a cero. En este segundo caso, la curvatura K mide la desviación de la longitud de un pequeñísimo círculo respecto al valor $2\pi r$ que aprendimos en la escuela primaria y que es el valor de l en la geometría de Euclides. Nótese que K puede variar de un punto a otro de la superficie.

Estamos ya listos para definir la curvatura de Riemann. En un punto O del espacio riemanniano bajo estudio constrúyase una superficie suave S formada por curvas geodésicas. La curvatura de Riemann en el punto O es igual a la curvatura gaussiana K de S . En general, podemos trazar varias superficies geodésicas en el punto O y para cada una de ellas tendremos un valor de la curvatura gaussiana. En tal caso, la curvatura de Riemann no está caracterizada por un solo número sino por varios; cuántos de estos números se requerirán dependerá de la dimensionalidad del espacio y de su geometría intrínseca, es decir, de su métrica. Al sistema de números necesario Riemann le llamó el tensor de la curvatura. Este mide la desviación de la métrica de un espacio respecto a la métrica euclidiana. Nos dice, por ejemplo, qué tanto difiere de 180° la suma de los ángulos internos de un triángulo, o qué tanto se aleja de $2\pi r$ la circunferencia l de un círculo de radio r . La curvatura de Riemann varía, en general, de un punto a otro del espacio y no está dada por un solo número, sino por un cierto sistema de números, que en matemáticas se llama tensor.

Cuando el tensor de curvatura de Riemann no cambia al variar el punto O en que se calcula, decimos que el espacio es homogéneo. Si el espacio riemanniano es inhomogéneo, no se puede trasladar una figura geométrica sin alterar las distancias entre los puntos que la forman. Movimientos rígidos —como la traslación y la rotación—, a los que tan acostumbrados estamos en nuestro mundo euclidiano, no son ya posibles. Si, por otro lado, el espacio es homogéneo, recuperamos tales movimientos rígidos de las figuras. El ejemplo más sencillo de un espacio riemanniano homogéneo es el espacio euclidiano, pues en él todo el tensor de curvatura es nulo en cualquier punto: podemos decir que un espacio euclidiano es homogéneo y sin curvatura. Otro ejemplo de espacio con homogeneidad es el de Lobachevski: la curvatura de la

seudoesfera es una constante negativa. Finalmente, una esfera de n dimensiones embebida en un espacio euclidiano con $(n + 1)$ dimensiones es un ejemplo de espacio riemanniano homogéneo con curvatura positiva. El plano —espacio no-curvo—, la pseudoesfera —cuya geometría es casi equivalente a la de Lobachevski— y la esfera son todos casos particulares de la geometría de Riemann. En estos tres ejemplos, el tensor de curvatura se reduce a un solo número y el valor de éste no cambia al ir de un punto del espacio a otro. Los tres espacios son, pues, homogéneos y en ellos podemos trasladar rígidamente las figuras geométricas.

Una vez que llegamos a este punto, no vendría mal releer las *Notas sobre el origen de la teoría general de la relatividad* que el mismo Einstein escribió y cuya traducción presentamos en el capítulo III de este libro. Allí, Einstein habla de las líneas extremas, que no son otra cosa que las geodésicas aquí mencionadas; se refiere también a la métrica de Riemann y a su tensor de curvatura. El significado geométrico de estos términos ha sido insinuado en el presente capítulo. Nos queda por aclarar, sin embargo, cuál es la relación de estas consideraciones geométricas con la fuerza gravitatoria. ¿Por qué, en particular, la gravitación cambia la estructura local euclidiana del espaciotiempo que nos rodea para inducir una métrica riemanniana? Veremos en lo que sigue cómo esta modificación geométrica surge del principio de equivalencia, que se pone de manifiesto en los resultados que Eötvös obtuvo con ese simple y maravilloso aparatito, la balanza de torsión.



XVI. EL PRINCIPIO DE EQUIVALENCIA

UN EXPERIMENTO muy interesante que todos podemos realizar es el siguiente: Consígase una báscula, de esas que mucha gente utiliza por las mañanas para medir su peso. Coloque luego la báscula en el piso de un elevador cuando éste se halle en reposo en la planta baja y verifique una vez más como ha andado su dieta últimamente, es decir, averigüe su masa m . Apriete entonces el botón que marca el último piso del edificio (mientras más alto y moderno sea éste, mejor). Observe luego la aguja marcadora de la báscula y ¡verá que su peso aumenta!

La razón de todo ello no es difícil de entender. En efecto, al subimos a la báscula y permanecer quietos sobre ella, la fuerza F que aquélla ejerce sobre nuestro cuerpo contrarresta el peso, que vale mg , donde g es la aceleración de la gravedad en la superficie terrestre, que vale aproximadamente 9.8 m/s^2 . Esta fuerza F , que apunta hacia arriba, es la que registra la aguja de la báscula. Cuando el elevador arranca hacia el último piso, recibe una aceleración A de signo contrario a g , la cual apunta hacia abajo. Ahora F , que vale lo que marca la aguja de la báscula, no sólo contrarresta el peso sino que acelera la masa m . En consecuencia, $F - mg$, la fuerza total que actúa sobre la persona de masa m debe valer mA , según nos enseñó Newton en su segunda ley. El valor de F que registra la báscula es $m(A + g)$: el peso de la persona aumenta. El efecto contrario se tendría si el elevador bajara; en tal caso, F sería menor que el peso. En caída libre, cuando $A = g$ y del mismo signo, F es cero. El elevador y con él, la báscula y usted mismo, caen hacia abajo, todos por igual. La persona ya no presiona a la báscula y ésta, por tanto, tampoco a la persona. Es como si la persona no se hubiera puesto en contacto con el aparato para medir su peso y la medición resulta nula. En un elevador en caída libre se anula el peso, es decir, se cancela el efecto de la gravedad terrestre.

¿Qué ocurriría, se preguntó ese gran maestro de los experimentos pensados, Albert Einstein, si el observador que se halla en el elevador no supiera dónde se encuentra? Imaginemos que la persona que mide su peso ha nacido dentro de un elevador y no sabe que se encuentra en un sistema de referencia que no es inercial. Ese habitante nativo del elevador, sin comunicación con el exterior y acelerado siempre en la misma dirección, creería que su peso es $m(A + g)$ cuando en realidad es sólo mg . En otras palabras, un sistema acelerado altera el peso, es decir, induce una fuerza equivalente a la gravitación. He aquí el principio de equivalencia.

Cuando trabajé en Princeton, allá por 1967, se montó una exposición extraña en tan serio recinto: una muestra de juguetes. En ella se podían ver los ingeniosos juguetes que el Profesor Eric Rogers le había obsequiado a Einstein, uno en cada día de su cumpleaños. Los juguetes no eran juguetes para niños, sino más bien para sabios. En todos ellos había un misterio físico que don Alberto debía descifrar. Dejemos que el mismo Rogers nos describa uno de esos juguetes, el que demuestra el principio de equivalencia.

Mientras vivía en Princeton, de tiempo en tiempo mi esposa y yo le llevábamos un pequeño acertijo físico a nuestro vecino, el profesor Einstein, a menudo como un regalo de cumpleaños.

El último de esos acertijos, que le obsequiamos en su setenta aniversario, fue, según creo, original. Surgió de un antiguo juego para niños: una pelota amarrada a una cuerda se liga a una copa con la cual el niño debe pescar la bola. Nuestra modificación del juguete era un problema destinado a Einstein, que el disfrutó y resolvió de inmediato.

Poníamos una bola de metal atada a un hilo y todo dentro de un globo transparente. En el centro del globo había una copa, también transparente, en la cual debería depositarse la bola de metal. Inicialmente, la bola yacía

fuera de la copa y el hilo se pasaba por ella, y luego por un tubo central transparente. Debajo del globo, el hilo se ataba a un resorte, largo y débil, protegido por otro tubo transparente que terminaba en un palo de escoba.

El problema consistía en lo siguiente: Si la bola cuelga fuera de la copa, se debe conseguir meterla en ella con un método absolutamente seguro –en contraste con el éxito ocasional que se tendría agitando el palo de la escoba al azar.

La solución del enigma del profesor Rogers nos la cuenta Bernard Cohen, en su relato de una entrevista a Einstein realizada en 1955. Nos dice Cohen:

... de repente, Einstein se volvió y me dijo: –Espere, espere, le debo enseñar mi regalo de cumpleaños.

De regreso a su estudio vi a Einstein tomar de un rincón algo que recordaba un cortinero, de cinco pies de largo, con una esfera de plástico en su extremo. Del cortinero salía hacia el centro de la esfera un pequeño tubo de plástico, y de este una cuerda con una bolita en su extremo.

"Verá –me dijo Einstein– todo esto ha sido diseñado para ilustrar el principio de equivalencia. La bolita está atada a la cuerda, que va dentro del tubo y se amarra a un resorte. Este resorte tira de la bola, pero no la puede meter en el tubito ya que no es lo suficientemente fuerte para vencer la fuerza gravitacional que jala la esfera".

Una sonrisa bonachona inundó su cara y sus ojos brillaron con placer cuando dijo: "Y ahora, el principio de equivalencia". Agarró entonces el cortinero y lo llevó hasta que la esfera de plástico rozara el techo. "Ahora lo dejare caer –dijo Einstein– y de acuerdo al principio de equivalencia no habrá fuerza gravitacional. El resorte será lo suficientemente fuerte para llevar a la bolita dentro del tubo de plástico". Así, dejó caer en forma brusca el artefacto, libre y a lo largo de la vertical, guiándolo con su mano hasta que el cortinero llegó al suelo. La esfera de plástico estaba entonces al nivel de nuestros ojos. Desde luego, la bolita se hallaba dentro del tubo.

Con esa demostración de su regalo de cumpleaños, la entrevista llegaba a su fin...



XVII. LA MASA GRAVITATORIA ES INERCIAL

EN REALIDAD, en los razonamientos anteriores mezclamos dos tipos de masa para el mismo cuerpo. Una, que deberíamos haber llamado masa inercial y que ocurre en la segunda ley de Newton, y otra, que deberíamos haber llamado gravitacional y la cual define el peso. Lo misterioso —y esto se conoce también como el principio de equivalencia— es que ambas masas, la inercial y la gravitacional, coinciden con una precisión asombrosa. Con la balanza de torsión, como ya hemos visto, se ha demostrado que el principio de equivalencia es válido hasta en una parte en 10 billones.

Antes de darse cuenta de que la clave estaba en el principio de equivalencia —que tiene sus raíces en los razonamientos y en las experiencias que hizo Galileo en Pisa, cuando vio que los cuerpos pesados y los ligeros se aceleran por igual en el campo de la gravedad terrestre—, Einstein buscó otros caminos. Le molestaba la acción a distancia, implícita en las ideas de Newton, pues tal noción contradecía de manera frontal las ideas relativistas. Habría que acoger a la gravitación dentro de la teoría especial de la relatividad, y así sustituir la transmisión instantánea de la información gravitatoria. Cuando Einstein intentó, según él mismo nos cuenta en las *Notas sobre el origen...*, incluir a la fuerza de gravedad en sus ecuaciones de movimiento relativistas, se enfrentó a una pared insalvable: un proyectil que se soltara del reposo en el campo de gravedad terrestre caería con una aceleración vertical g ; según Galileo y Newton, esta aceleración vertical sería la misma si al proyectil se imprimiera de inicio una velocidad horizontal. Pero las ecuaciones de la teoría especial de la relatividad no predecían esto. Según Einstein abordó primero la cuestión, la velocidad de caída de un proyectil dependería de su velocidad horizontal, en contra de lo que había hallado Galileo al lanzar sus bolas de cañón. Por ello Einstein dirigió su poderosa mente a entender este último resultado y comprendió que era una manifestación del principio de equivalencia.

Para ver las profundas repercusiones de este principio y sus consecuencias sobre la geometría del espaciotiempo, tratemos de entender mejor el intento fallido de Einstein al querer hacer relativista a la gravitación. La fuente de esta fuerza es la "masa". Hemos empleado la palabra "masa" (así, entre comillas) pues nos enfrentamos a un problema espinoso. Tenemos varias "masas", diferentes conceptos para el mismo término, la misma palabra que se mide de maneras diversas. Podría ser, por ejemplo, que en la frase anterior "masa" significara sólo la masa en reposo. Pero también "masa" podría ser lo que llamamos masa-energía, aquella que entra en la famosa ecuación de Einstein $E = mc^2$, y que sólo difiere de la energía por las unidades que se empleen para medirla. Para los cuerpos terrestres y aun para los objetos astrofísicos ordinarios, la diferencia cuantitativa entre ambas masas es muy pequeña. Empero, desde un punto de vista conceptual son diferentes. Veremos a continuación, con un experimento pensado más, que la fuente del campo de fuerzas gravitatorias debe ser la que hemos llamado masa-energía.

Se pueden distinguir tres tipos de masas, que se definen por un conjunto de operaciones diferentes. Tenemos, primero, la masa inercial m_I que mide la resistencia a la aceleración. A este tipo de masa contribuyen todas las formas de masa-energía dentro del objeto macroscópico. En el caso de un gas, por ejemplo, a m_I contribuye la suma de las energías cinéticas de las moléculas que lo forman. A un segundo tipo de masa le podríamos llamar masa gravitacional pasiva, denotándola por m_{GP} . Esta es la masa que determina cuánto afecta al objeto la gravedad. La tercera clase de masa es la gravitacionalmente activa m_{GA} , que genera la fuerza de gravedad.

Ya sabemos que los experimentos de Eötvös y de Dicke nos dicen que $m_{GP} = m_I$, o sea, que la masa gravitacional pasiva y la masa inercial son idénticas. Lo interesante es que también $m_{GA} = m_I$, o lo que es equivalente, $m_{GA} = m_{GP}$. Las masas gravitacionales, sean pasivas o activas, son idénticas entre sí y, a su vez, son indistinguibles de la masa inercial m_I .

Para demostrar la igualdad entre m_{GA} y m_I recurrimos a un experimento pensado, que vaya de acuerdo a la

teoría especial de la relatividad. Tómense dos recipientes macroscópicos de gas, iguales entre sí, con todas sus moléculas en reposo y unidos uno al otro. La fuerza gravitacional que el primer recipiente ejerce sobre el segundo es igual y de signo contrario a la que este último ejerce sobre el primero. Esto ya lo sabía Newton y lo expresó en su tercera ley. La fuerza gravitacional sobre el sistema de dos recipientes, considerado como un todo, es pues nula y el sistema de los dos recipientes no se mueve. Ahora imaginemos—la imaginación limitada por las leyes naturales es la esencia de los experimentos pensados—que una de las moléculas quietas dentro del segundo contenedor desaparece y que su masa en reposo se convierte totalmente en energía. Esa energía no puede salir del recipiente y se gasta en elevar la temperatura del segundo gas, en mover sus moléculas. La masa en reposo de éste disminuye, pero su masa-energía, que según la teoría especial de la relatividad es su masa inercial, no cambia. Si la masa gravitacional activa m_{GA} fuera sólo la suma de las masas en reposo, el jalón gravitacional del segundo sobre el primer recipiente decrecería, mientras que el del primer gas sobre el segundo seguirá siendo el mismo que era al inicio del proceso. Ya la fuerza gravitatoria total cesaría de ser nula y ¡el sistema de dos recipientes empezaría a moverse! Tal conclusión repugna, es absurda físicamente, no observada. Por consiguiente, no queda sino pensar que los tres tipos de masa son idénticos.

Las consecuencias del razonamiento anterior son insospechadas. La masa gravitacional activa es igual a la masa inercial, que incluye todas las formas de energía presentes en el sistema. Una de tales manifestaciones de la energía es la gravitación misma. Nótese que tal problema no existe cuando se tratan las cuestiones electromagnéticas, pues el campo electromagnético no da lugar a otro campo de igual naturaleza.

En la teoría relativista de la gravitación, por su parte, la masa es la fuente del campo gravitacional, que contribuye a la energía gravitacional y ésta a la masa. La masa es fuente de la gravitación que a su vez es fuente de la masa. El problema es como el de aquel ser mítico griego, el *uroboros*, serpiente que tragaba su propia cola. Como en otros problemas de la física actual, los *uroboros* dan origen a teorías no-lineales. La teoría relativista de la gravitación ha de ser, pues, una teoría no-lineal. Si estos efectos, que fuerzan al sistema a tragar su propia cola, no se toman en cuenta, las predicciones teóricas no son correctas y al compararlas con el experimento tendremos que desecharlas.

Ahora podemos ya comprender aquel párrafo escrito por Einstein... "en la primera teoría que investigué, la aceleración del cuerpo que cae no era independiente de la velocidad horizontal ni de la energía interna del sistema". Al dar más velocidad horizontal a la partícula, su masa-energía aumentaba pero el jalón de la Tierra no cambiaba, como debería. En su primer intento, Einstein no hacía justicia a Galileo.



XVIII. EL CORRIMIENTO HACIA EL ROJO

RETORNEMOS a nuestro físico-elevadorista, que no sabe de la existencia de ningún otro sistema de referencia, salvo su elevador acelerado donde ha pasado sus días reflexionando sobre el movimiento de los cuerpos, sobre el tiempo y el espacio y, por qué no, sobre el espaciotiempo. Las conclusiones a las que este físico llega serán idénticas a las que obtendrá un colega suyo pegado al campo gravitacional terrestre. Por dar un ejemplo: si ambos físicos detuvieran con sus manos sendas bolas, una pesada y otra ligera, y luego las soltaran, ambos colegas las verían caer con la misma aceleración g si el elevador sufriera una aceleración g hacia arriba. Y si el elevador cayera luego, el físico-elevadorista vería caer las bolas junto con él, como si no hubiera gravedad. Todo ello es correcto si el elevador no es muy grande. Llegamos así a una consecuencia maravillosa: la gravedad y un sistema de referencia acelerado son la misma cosa, al menos localmente, es decir, si el elevador no es muy grande.

Con este principio de equivalencia, que relaciona aceleración con gravedad, Einstein imaginó a un elevador acelerado por algún mecanismo misterioso y tan alejado de cualquier otro cuerpo que no habría efecto alguno sobre el elevador o lo que en él se hallase. Tomaba dos relojes muy precisos, idénticos uno al otro, que marcaban el tiempo al mismo ritmo. Uno de esos relojes se colocaba en el piso del elevador y el otro en el techo. La cuestión se reducía a comparar el ritmo de los relojes.

Pongamos al físico-elevadorista en el techo y veamos qué opina sobre el caminar de los relojes. Para compararlos necesita ver el reloj del suelo y por ello es preciso que tome en cuenta a la luz que viaja en el elevador y le lleva información del reloj que no está cerca de él. Si cada vez que el reloj del suelo hace tic tac envía un pulso de luz, el observador en el techo recibirá los tic tacs cada vez más espaciados, pues el techo se aleja cada vez más aprisa de ese reloj. En consecuencia, nuestro físico recibe los destellos de luz a un ritmo más lento que el de los tic tacs que los dispararon. Su conclusión es inevitable: el reloj del suelo marcha más lentamente que el del techo, aun cuando ambas máquinas para medir el tiempo son idénticas. Nótese que si el físico se coloca en el suelo el resultado es el mismo: el suelo se aproxima al techo cada vez más aprisa y el físico verá que el del techo emite señales luminosas más frecuentes. Otra vez, el reloj en el piso del elevador marcha más lentamente que el del techo.

Cambiamos ahora el sistema acelerado por el campo gravitacional terrestre. Ambos marcos de referencia son equivalentes. El reloj más cercano a la Tierra va más lento que el otro. Si en vez de relojes usamos átomos que emitan luz a una frecuencia dada, los átomos en el suelo emitirían luz de menor frecuencia que la que emitan átomos idénticos colocados en el techo. En el Sol, cuyo campo gravitacional es más intenso que el de la Tierra por ser mucho más masivo, la frecuencia emitida por un átomo dado sería menor que en nuestro planeta. Veríamos la luz desplazada hacia el rojo, es decir, hacia longitudes de onda mayores.

No vendría mal, llegados a este punto, llevar a cabo otro de esos maravillosos experimentos pensados de Einstein, uno que revela la íntima conexión entre la gravitación y el tiempo. Para ello, usemos resultados firmemente establecidos de la física relativista y de la física de los cuantos, la mecánica cuántica, y liguémoslos con el principio de Galileo.

De la física cuántica aplicada a los átomos y a la luz, tomaremos estas conclusiones: un átomo puede hallarse en uno de muchos estados, llamados estacionarios, uno de los cuales es el de menor energía, el estado base; la luz está formada por cuantos de energía, los fotones, cuya energía es igual a la constante de Planck $h = 6.07 \times 10^{-27} \text{ erg} \cdot \text{s}$ multiplicada por su frecuencia; si el átomo pasa de un estado excitado a su estado de menor energía, emite un fotón de la energía (y de la frecuencia) apropiados, y viceversa: la luz de esta frecuencia puede ser absorbida por el átomo en su estado base y aquél llega a excitarse.

De la física relativista, la que se aplica al movimiento y peculiaridades de la luz y otros objetos rápidos como ésta, tomamos prestadas las siguientes conclusiones: la luz que se refleja de un espejo en movimiento sufre un cambio en su frecuencia, el llamado corrimiento Doppler; si el espejo se acerca al

observador, el corrimiento es hacia el azul —es decir, a frecuencias más altas—, o hacia el rojo si el espejo se aleja; sobre el espejo que la refleja, la luz ejerce una presión; el tiempo se define por los medios —o sea, los relojes— usados para medirlo, y la energía es masa como lo dice la famosa relación $E = mc^2$

Ahora estamos listos para pensar como sólo Einstein pudo hacerlo y aplicar su lógica implacable al siguiente jugueto, inocente en apariencia. Piénsese en una de esas bandas sin fin, como las que usan los empleados de un estacionamiento para subir a pisos superiores y recoger los autos. Cada tanto se colocan cubetas, igualmente espaciadas a lo largo de la banda que une la planta baja con un piso superior. Según se le ve de frente, las cubetas de la derecha, que suben, llevan átomos en su estado base; las cubetas que bajan están, por su parte, llenas de átomos todos en el mismo estado excitado. Cuando los átomos excitados llegan a la planta baja, se les fuerza al estado base al emitir luz de una frecuencia dada. Esta se capta en un espejo y se dirige hacia la planta alta, donde se usa para llevar los átomos, que llegan al piso superior, del estado base en que se encuentran al estado excitado deseado. Los átomos del lado izquierdo, los que bajan, son entonces siempre más energéticos que los que suben. Según la fórmula relativista son, pues, más masivos y, de acuerdo con Galileo o con el principio de equivalencia, más pesados: la banda sin fin continuará moviéndose para siempre, en movimiento perpetuo bajo el efecto del campo gravitacional terrestre. Con el curioso mecanismo propuesto por Einstein tendríamos, en consecuencia, un *perpetuum mobile*, que genera energía de la nada. Ya que esto último es imposible, debe haber gato encerrado en algún punto del razonamiento anterior. ¿Dónde puede hallarse nuestro error?

Si damos por sentados los principios cuánticos y relativistas expuestos en el preámbulo, la falla en el razonamiento sólo puede hallarse en el principio de reciprocidad según el cual la luz se emite y absorbe a la misma frecuencia. Este hecho experimental de la física atómica se ha demostrado sólo cuando los átomos están sujetos al mismo campo gravitacional. Si la frecuencia de la luz se corriera al rojo, como habíamos concluido antes dentro del elevador, la energía de los fotones al llegar al piso superior no bastaría para excitar los átomos que suben. Estos no alcanzarían a excitarse y el sistema no se hallaría en movimiento perpetuo. Nuestro *perpetuum mobile* de la primera especie se habría desvanecido y, resuelta la paradoja, tendríamos una prueba más del corrimiento hacia el rojo de los fotones en un campo gravitacional.

Para poner a prueba que el corrimiento al rojo arregla las cuentas energéticas del dispositivo sin fin imaginado por Einstein, busquemos aumentar la frecuencia de la luz cuando llega al espejo del piso superior, es decir, deseamos correrla hacia el azul. Según dijimos antes, tal efecto lo podemos conseguir si reflejamos la luz en un espejo que se acerque al observador. Construimos, pues, un conjunto de espejos que rotan en la dirección y con la velocidad apropiadas. Ahora, la frecuencia de la luz es la requerida y la banda sin fin opera sin problemas. Pero ya no se viola la sacrosanta ley de la conservación de la energía, pues ésta se requiere para mantener girando al conjunto de espejos, que de otra forma se pararían a causa de la presión que la luz ejerce sobre ellos.

El corrimiento al rojo puede calcularse, como lo sugirió el mismo Einstein en su trabajo publicado en 1916. Para una torre de altura l en la superficie terrestre, el cambio relativo en frecuencia es g^l/c^2 . Si la torre mide 22.5 metros de altura, esta cantidad tiene el pequeñísimo valor de 2.45×10^{-15} . Sin embargo, usando el llamado efecto Mossbauer —que consiste en la emisión de rayos gamma de baja energía en algunas estructuras cristalinas— tan minúsculos corrimientos al rojo pueden medirse. Eso hicieron en los sesentas Pound y sus colaboradores en una torre de Harvard y dieron la razón a Einstein. He aquí una liga más entre las torres y la historia de la gravitación.

El corrimiento al rojo también ha sido verificado en otros casos. Se le ha detectado en la luz proveniente del Sol y, más impresionante aún, al comparar la marcha de un reloj fijo en la Tierra con la de otro que se llevó a pasear alrededor del mundo en un avión comercial. En todos los casos, Einstein estaba en lo correcto: el campo gravitacional retrasa los relojes.

Indice



XIX. LA TEORÍA GENERAL DE LA RELATIVIDAD

LA CONCLUSIÓN más interesante que podemos sacar de esta discusión es que el campo gravitacional afecta los intervalos de tiempo. Pero, según ya vimos al enunciar la teoría especial de la relatividad, el tiempo y el espacio no pueden separarse. El verdadero escenario para los sucesos naturales es el espaciotiempo. Lo que se afirme para el espacio o lo que se diga para el tiempo es una expresión verdadera sólo en un marco de referencia particular. Las cuestiones relativistas se expresan en el espaciotiempo. Vistos desde esta perspectiva, nuestros experimentos, pensados o reales, nos llevan a concluir que el campo gravitacional, al cambiar los intervalos de tiempo, altera la geometría del espaciotiempo. La gravitación induce una curvatura; el espaciotiempo deja de ser plano y se convierte en un espacio no-euclidiano, donde prevalece la geometría de Riemann. Cuando la gravedad no es muy intensa, la curvatura es ligera y el espaciotiempo aparenta ser plano. Las conclusiones de Einstein tienden entonces, como un caso límite, a las de Newton.

El atraso en la marcha de los relojes causado por el campo gravitacional indica de inmediato que el espacio-tiempo es curvo. Veamos por qué, usando para ello la analogía con una esfera, espacio curvo de dos dimensiones, donde intentaremos dibujar un cuadrado. Partimos de un punto **A** y a lo largo de un círculo máximo, o sea, recorriendo una geodésica, marcamos un punto **B** a una distancia l ; salimos luego de **B** por una geodésica perpendicular a la curva **AB** y llegamos al punto **C**, a una distancia también l de **B**. Sobre una geodésica perpendicular a **BC** y a una distancia l del punto **C**, llegamos a **D**. Finalmente, a lo largo de un círculo máximo perpendicular al arco **DC** recorreremos la distancia l , con la esperanza de llegar al punto de partida, que es **A**. La sorpresa —y esto es fácil de comprobar dibujando la trayectoria **ABCD** en una pelota— es que nunca llegamos al punto **A**; el cuadrado no se cierra, porque el espacio es curvo.

Ahora intentemos construir ese cuadrado en el espaciotiempo en presencia de un campo gravitacional. Tomemos dos puntos **A** y **B** a diferente altura sobre la Tierra. Tracemos la línea del mundo para el punto **A** dejando transcurrir, digamos 10 segundos, para llegar en el espaciotiempo al punto **C**. Hacemos lo mismo con **B** y al cabo de 10 segundos llegamos al punto **D** en el mismo espaciotiempo. Como los relojes marchan a ritmo diferente en **B** y **A**, el punto **D** no está exactamente arriba de **C**. En conclusión, no podemos construir el cuadrado en el espaciotiempo, igual que no podíamos trazarlo sobre la esfera. La razón es la misma en ambos casos: los dos son espacios riemannianos, que tienen curvatura no nula.

Ahora estamos listos para expresar los postulados de Einstein sobre la gravitación, la teoría general de la relatividad. Einstein nos dice cómo cambia la geometría del espaciotiempo cuando hay masa presente. Y nos dice también cómo se mueven los objetos si sólo hay fuerzas gravitacionales. En cuanto a la primera cuestión, afirma que la curvatura es proporcional a la masa. Respecto a la segunda cuestión, nos dice que los objetos se mueven a lo largo de las geodésicas en el espaciotiempo. Esta última es la forma einsteniana para las ecuaciones de movimiento y el primer postulado reemplaza la ley newtoniana de la gravitación universal, que llevaba implícita la idea de acción a distancia.

Para expresar sus leyes en forma matemática, Einstein luchó y trabajó fuertemente durante muchos años. En 1907 publicó el principio de equivalencia; en 1911 presentó otro artículo sobre el efecto de la gravedad en la propagación de la luz y llegó a un resultado igual al newtoniano: la luz al pasar rozando al Sol se desviaría 0.85" de arco. Este número es sólo la mitad de lo que él mismo obtendría luego, con la teoría general de la relatividad ya completa. La forma final de la teoría, que requirió de una nueva estructura matemática, el cálculo tensorial, llegó sólo siete años después. ¿Por qué ocurrió esta dilación? ¿Por qué siguieron tantas pistas falsas él y su antiguo condiscípulo, el matemático Marcel Grossman? La razón nos la cuenta el mismo Einstein en las tantas veces mencionadas *Notas sobre el origen*... No es fácil para un físico librarse de ideas tan acendradas como aquella de que las coordenadas tienen un claro significado métrico. Es difícil darse cuenta de que el espacio no es el mero escenario donde los cuerpos se mueven e interactúan, sino que la geometría misma de ese espacio depende de la presencia y de la distribución de la materia. Esta causa un cambio en la curvatura del espaciotiempo, curvatura que a su vez origina la

gravedad.

Las ecuaciones de campo de Einstein son ecuaciones muy complejas, que determinan el tensor métrico g_{ν} . Son, como lo pide el hecho de que la masa-energía genera el campo gravitatorio y éste a su vez influye sobre la masa, ecuaciones no-lineales. En el límite no-relativista, cuando todo se mueve lentamente respecto a la luz, las de Einstein coinciden con las ecuaciones de Newton. En ese sentido, la teoría general de la relatividad es una teoría relativista de la gravitación. Las ecuaciones de Einstein se han podido resolver en algunos casos particulares y así comparar sus predicciones con las newtonianas y con las observaciones experimentales. Siempre que esto ha sido factible, la naturaleza ha dado la razón a Einstein y a su bella concepción geométrica de la fuerza de gravedad.



XX. LAS PRIMERAS PRUEBAS

TRES hechos predijo Einstein en 1916 con su nueva teoría de la gravitación. Uno de ellos, el corrimiento hacia el rojo, ya lo mencionamos. Como dijimos, no fue sino hasta 1960, cuando los físicos ya contaban con el efecto Mossbauer, que la teoría general de la relatividad pudo saltar limpiamente este valladar. Las otras dos pruebas, hoy conocidas como clásicas, son el corrimiento del perihelio de Mercurio y la desviación de la luz al pasar cerca de una gran masa. Veamos primero lo referente a Mercurio.

Hacia finales de 1915, Einstein le escribe a otro físico famoso, Arnold Sommerfeld. Le cuenta que en el último mes ha vivido el periodo más emocionante de su vida, pues había logrado mostrar que su nueva teoría se reducía a la de Newton en una primera aproximación y que, como una segunda aproximación, podía explicar el corrimiento del perihelio de Mercurio, problema famoso que había resistido hasta entonces los embates de físicos y astrónomos.

Según hemos relatado, la teoría gravitacional de Newton predice que un planeta alrededor del Sol se mueve en una elipse, curva cerrada. La distancia r del planeta al Sol oscila entre una mínima, llamada perihelio, y otra máxima, que se conoce como afelio. Lo notable, cuando la fuerza es, como la de Newton, que varía inversamente con el cuadrado de r , es que esa distancia va del perihelio al afelio en un tiempo idéntico a la mitad del periodo. La trayectoria del planeta se cierra y, si no fuera perturbado, recorrería la misma elipse una y otra vez, por los siglos de los siglos.

En la mecánica clásica, sólo la fuerza universal de la gravitación y otra, la del resorte, que produce una fuerza lineal con r , conducen a órbitas cerradas, siempre y cuando la energía del cuerpo sea tal que éste no escape a una distancia infinita del centro de fuerzas. Tal resultado se conoce como el teorema de Bertrand y tiene su origen en las llamadas simetrías ocultas.

Si la acción del Sol se perturba —por la presencia de otros planetas, por ejemplo—, la trayectoria no se ajusta exactamente a una elipse, y el perihelio se corre un poco, vuelta tras vuelta. Tal efecto es más fácil de observar para los pacientes astrónomos mientras más rápido sea el planeta —pues entonces el corrimiento se acumula más a lo largo de los años—, y mientras más oblonga (o excéntrica) sea la órbita, pues en este caso el perihelio es más notable. Ambas propiedades las tiene Mercurio, que es el más rápido de los planetas y el que tiene la órbita más excéntrica. Por ello, la atención de físicos y astrónomos se centró en este planeta, para observar detenidamente su órbita, su perihelio, y para calcular las perturbaciones de otros planetas.

El conocimiento sobre este fenómeno planetario era, mientras Einstein sufría con su amigo Grossmann para hallar sus ecuaciones de campo, el siguiente: El perihelio de Mercurio se corre cada cien años por un ángulo igual a 574" de arco. Los cálculos teóricos, que tomaban en cuenta la perturbación de otros planetas, llevaban sólo a un corrimiento de 532" cada siglo. En tales cálculos se tenía una confianza ilimitada, sobre todo después de que Leverrier predijo la existencia de Neptuno con la misma técnica. Este mismo físico francés, llevado del entusiasmo que sólo da el éxito, había incluso propuesto la existencia de otro planeta —que bautizó prematuramente con el nombre de Vulcano—, para explicar la divergencia entre teoría y observación. Empero, Vulcano nunca hizo acto de presencia y el enigma del perihelio de Mercurio y su corrimiento quedó ahí como un reto insalvable para la física de Newton: la divergencia de 42" de arco cada siglo era inexplicable.

Cuando surgió la teoría especial de la relatividad, varios físicos aplicaron las ecuaciones de movimiento relativistas al caso planetario. Encontraron, en efecto, que el perihelio de la órbita se corría por un ángulo del orden de $v^2/2c^2$, donde v es la velocidad promedio del planeta. Esto, una vez más, no basta para alcanzar los famosos 42" de arco, siempre faltantes. Entonces vino Einstein, con su teoría del campo relativista de la gravitación. Lo que sigue de la historia ya lo sabemos. Como él lo cuenta a Sommerfeld, su nueva teoría explica el misterio de Mercurio y predice los corrimientos correctos para la Tierra y Marte,

según se ha visto después.

Hacia 1919, la superioridad de la teoría einsteniana sobre la de Newton radicaba sólo en ese minúsculo corrimiento de la órbita de Mercurio. Ventaja magra en verdad, sobre todo si tenemos claro el enorme cambio conceptual que significa la teoría general de la relatividad. No es fácil dejar caer una teoría tan precisa como la newtoniana, creer que el espaciotiempo es curvo y abandonar el significado de las coordenadas, tan caro a los físicos, por sólo una minucia, un corrimiento de 42" a lo largo de cien años. Una comprobación más espectacular de la nueva teoría sería, pues, necesaria. La suerte estaría del lado de Einstein, como ahora veremos.

Arthur Eddington, astrónomo inglés, debió ser un hombre muy pagado de sí mismo. Según cuentan, allá cuando terminaba la primera Guerra Mundial, alguien mencionó en su presencia que sólo tres personas entendían la teoría general de la relatividad. Eddington contestó preguntándole a su interlocutor: ¿Y quién es el tercero? En todo caso, el astrónomo inglés estaba consciente de la importancia de las ideas einstenianas y se hallaba dispuesto a probarlas.

Ya se mencionó un artículo de Einstein, escrito en 1911, en el que se predice que la luz se desvía al pasar cerca de un objeto masivo, como el Sol. En aquel entonces, Einstein predijo una desviación de 0.87" de arco si la luz de una estrella pasara rozando el Sol, resultado que coincide con el de la mecánica clásica de Newton, si en ella se hacen algunos ajustes. Ya con su nueva teoría bien desarrollada, el gran físico relativista volvió a calcular la desviación de la luz, ahora desde la nueva perspectiva. Si la masa del Sol curva el espacio y todo ente material —incluida la luz— debe seguir las geodésicas del espaciotiempo curvado, la luz ha de desviarse. Las ecuaciones de la teoría general de la relatividad nos proveen con un nuevo valor para esa desviación, que es el doble del predicho clásicamente: la luz de una estrella lejana que pasa rozando al Sol se desvía un ángulo de 1.75" de arco.

Ya que la luz es tan rápida, podemos descartar todo experimento terrestre para medir su desviación. Por otro lado, para poder ver la luz de las estrellas, se requiere que la proveniente del Sol no las oculte. Tendremos, pues, que observar durante un eclipse total de Sol. Mas no basta un eclipse cualquiera; es necesario que éste ocurra cuando alineadas con el Sol podamos ver muchas estrellas, para así medir con más confianza y exactitud cómo se dobla la luz estelar. Sin duda, algo habrían dicho sobre la fortuna de Einstein los astrólogos, pero el Astrónomo Real de Inglaterra sabía más: la mejor conjunción de estrellas se tiene cada 29 de mayo y en el año de 1919 ¡habría en ese preciso día un eclipse total de Sol!

Los ingleses, ya superadas las vicisitudes de la guerra contra Alemania, se aprestaron a poner a prueba las conclusiones del gran Einstein, que por ese entonces trabajaba en Berlín, la capital del enemigo. Se organizaron dos expediciones, como una acción conjunta de la Royal Astronomical Society y de la Royal Physical Society. Una de ellas se dirigiría a Sobral en Brasil, y la otra, dirigida por Arthur Eddington, a la isla del Príncipe, en el golfo de Guinea. En estos dos sitios, el eclipse de Sol sería total y de larga duración, con inmejorables condiciones para observar la desviación de la luz.

Eddington mismo relata en su libro *Space, Time and Gravitation* la gran aventura científica. La expedición que fue al Brasil estaba mejor equipada que la otra. Además, el día 29 de mayo de 1919, en la Isla del Príncipe, el clima fue adverso; impertinentes nubes hicieron más arduo el trabajo de los fatuos británicos. Tomaron éstos, de cualquier forma, una serie de placas, donde podía medirse la desviación de la luz proveniente de las constelaciones de las Hiadas. Sus resultados preliminares indicaban que la desviación era de 1.61" de arco y el revuelo comenzó a generarse. Sin embargo, los ingleses también son cautos y decidieron esperar a los mejores datos provenientes de Sobral.

Las primeras placas tomadas en Brasil que fueron reveladas indicaron algo desconcertante: la desviación medida de la luz parecía estar acorde con la calculada mediante la física de Newton. Había en ellas, sin embargo, varias características —qué tan sesgadas, nadie lo sabrá— para eliminarlas. Las restantes placas, una vez reveladas, descubrieron algo maravilloso: ¡La observación astronómica confirmaba la teoría general de la relatividad! Así, Einstein se volvió famoso.

La historia anterior constituye una de las grandes ironías en la historia de la ciencia. Los experimentos de Eddington tenían sólo una precisión del 30%, y aun aquellos que los sucedieron no fueron experimentos mejores: los resultados se hallan dispersos entre el valor de la desviación predicha por Einstein y la mitad de ese valor. Las malas condiciones meteorológicas dificultaron siempre la observación. Sin embargo, Eddington hizo que Einstein se volviera famoso.



Indice |

XXI. ALBERT EINSTEIN, FÍSICO FAMOSO

DESPUES de la aventura del eclipse, Einstein se convirtió en el científico más famoso del mundo. Como pacifista y judío, recibían él y sus teorías relativistas frecuentes ataques en Alemania. Sin embargo, decidió permanecer en su país de origen e incluso retomar la ciudadanía alemana. Emprende luego una serie de viajes por Estados Unidos, Inglaterra, Francia, Palestina; visita también el Lejano Oriente. En 1921 recibe el Premio Nobel de Física, que se le otorga, curiosamente, por su descubrimiento de la ley del efecto fotoeléctrico y no por sus contribuciones a la relatividad que lo habían hecho famoso.

En los veintes y en Berlín, donde conservaba su puesto de profesor en la Academia Prusiana de Ciencias, el mismo puesto que aceptara desde 1914 cuando el káiser se lo ofreció, Einstein dirige su atención a un problema que le habría de mantener ocupado por el resto de sus días.

Busca una teoría del campo unificado, un marco conceptual único que englobara al electromagnetismo y a la gravitación. Este sueño de Einstein no se ha convertido en realidad hasta ahora, aunque la guía del gran maestro fue seguida por otros físicos. En los setentas se logró unificar, no la electricidad y el magnetismo con la gravedad como quería Einstein, sino las interacciones débiles con las electromagnéticas. Surgió así en 1970 la teoría electrodébil de Weinberg y Salam y la posibilidad de incluir también a las interacciones fuertes, para llegar a la gran unificación.

Los alegres veintes significaron para Einstein una época triste y difícil. Por un lado, vio nacer y establecerse en Alemania el poder de los nazis. Por otro lado, se alejó de las corrientes principales de investigación en física. En esos años la física cuántica establece firmemente sus raíces en la ciencia. Sus conceptos probabilísticos no son del agrado de Einstein, que continuaba afirmando: "Dios no juega a los dados." Son famosas las discusiones que Einstein sostuvo con Niels Bohr, gran físico danés a quien conoció en 1920. En el Quinto Congreso Solvay, que tuvo lugar en 1927, la esgrima intelectual entre estos dos gigantes de la ciencia moderna se inicia en forma espectacular y llega a su clímax en el Sexto Congreso Solvay, tres años después.

El mismo Bohr relata, en un artículo que apareció en el libro *Albert Einstein: Philosopher Scientist*, sus controversias. Uno de los problemas radicaba en el principio de incertidumbre, que había establecido Heisenberg poco antes como una de las bases de la mecánica cuántica y que a Einstein le molestaba en extremo. Una de tantas aplicaciones del principio de Heisenberg indica que no se puede medir con tanta precisión como se desee la energía de un proceso y el tiempo que éste dure.

Einstein planteó a Bohr el siguiente experimento pensado: Tómese una caja llena de radiación electromagnética y póngase un reloj adentro. El reloj opera un mecanismo para abrir y cerrar un obturador, agujero por el cual puede escapar de la caja un fotón. Si la caja se pesa antes y después de que el mecanismo abra el agujero durante un lapso muy pequeño y a un tiempo preciso medido por el reloj, tendríamos una violación del principio de incertidumbre. Dado el peso, tendríamos la masa m y de ahí la energía, según $E = mc^2$. Con su lanza relativista en ristre, Einstein buscaba destruir la armadura cuántica.

Parece que Bohr no pudo dormir en calma toda esa noche. La paradoja cuántico-relativista que le planteaba el sutil ingenio de Einstein no era una paradoja cualquiera. De pronto Bohr recordó otra de las grandes contribuciones de su contrincante: el principio de equivalencia, el retraso de los relojes en un campo gravitacional, y todo eso. Para medir la energía de la caja de fotones, Einstein propone pesarla, es decir, había en su proceso la presencia implícita de un campo gravitacional. Pero éste altera, según la teoría general de la relatividad, la marcha del reloj que se halla en la caja. Con las fórmulas mismas que Einstein usó para calcular el corrimiento hacia el rojo, Bohr hizo sus cuentas y el principio de Heisenberg salió incólume. No así Einstein, quien sin embargo nunca estuvo totalmente de acuerdo con la interpretación de la mecánica cuántica que pregonaba la Escuela de Copenhague, capitaneada por Bohr. Einstein siempre sostuvo que debería haber una teoría ulterior, más profunda que la cuántica, que

describiera mejor el mundo microscópico. En ello, con seguridad tenía razón.

En 1929, Albert Einstein cumplió cincuenta años y en la celebración se le colmó de honores. El mismo Planck le ofreció, en forma personal, una medalla. Pero la sombra nazi amenazaba a los judíos y al resto del mundo. Podía presentirse ya el momento en que Einstein abandonaría Alemania para siempre. Esto ocurrió en 1933, cuando se embarca con Elsa, su mujer, con destino a los Estados Unidos para trabajar en el entonces recién fundado Instituto de Estudios Avanzados de Princeton.

Una vez Einstein escribió: "Soy un verdadero navegante solitario y nunca he pertenecido con todo mi corazón a mi país, a mi hogar, a mis amigos o aun a mi familia cercana. Frente a tales ligas nunca perdí la sensación de distancia y la necesidad de soledad —sentimientos que se acrecientan con los años." En Princeton vivió de acuerdo a ello; su vida y su comida eran frugales, solitario se empeñaba en construir su teoría del campo unificado y en buscar paradojas a la mecánica cuántica. Disfrutaba de su música y también... de navegar.

A finales de 1936 muere su esposa, a la que sobreviviría por casi veinte años. La guerra se desata luego en Europa y de ahí se propaga al resto del mundo. Aunque Einstein no se involucra directamente en las cuestiones de la guerra, su instinto pacifista —curiosamente— lo lleva a firmar la famosa carta sobre la bomba atómica, dirigida al presidente Roosevelt. Al finalizar la guerra, debe retirarse oficialmente como profesor del Instituto. Pasa, sin embargo, activo los últimos diez años de su vida, buscando hasta el día 18 de abril de 1955 hacer realidad su sueño de tantos años: unificar los campos electromagnéticos y gravitacionales.



XXII. ¡POR FIN, LAS ONDAS GRAVITACIONALES!

VIMOS antes que las tres pruebas clásicas de la relatividad general involucran efectos minúsculos; de ahí que requieran mediciones muy precisas, no siempre factibles con los equipos experimentales con que en su momento cuentan los físicos. El corrimiento del perihelio de Mercurio requiere acumularse durante todo un siglo para ser apreciable; la pequeñísima desviación de la luz al pasar cerca del Sol necesitó un eclipse y una conjunción de estrellas; el corrimiento hacia el rojo hubo de esperar más de cuarenta años a que los experimentadores contaran con la nueva arma provista por el efecto Mossbauer. Los minúsculos efectos de la teoría general de la relatividad son, pues, difíciles de formular y, si cabe, más difícil resulta aún medirlos con la precisión adecuada.

A pesar de ello, otras tres consecuencias de la teoría de Einstein pueden ponerse a prueba: el retraso temporal de los ecos del radar, la existencia de hoyos negros y las ondas gravitacionales. Habría, además, otros efectos relativistas de carácter cosmológico; de ellos no nos ocuparemos aquí, pues nos alejaríamos del objetivo principal de este relato.

Cuando tratamos la desviación de la luz al pasar cerca del Sol, mencionamos que aquella se curvaba siguiendo una geodésica en el espaciotiempo. Esto implica que la luz se retrasa al pasar junto a un objeto masivo. Si pudiéramos enviar radiación electromagnética desde la Tierra a otro planeta y observar su eco, lograríamos medir el tiempo de viaje. En diferentes posiciones relativas de ese planeta, la radiación pasaría a veces cerca, a veces lejos del Sol. Según Einstein, en el primer caso debería haber un retraso temporal que puede calcularse. El máximo valor se tendría cuando la Tierra, el Sol y el planeta estuvieran alineados y con el astro en medio de los dos planetas. Si consideramos a Venus, la luz toma en el viaje de ida y vuelta a la Tierra cerca de media hora; el retraso, temporal máximo sería de 200 microsegundos, es decir, una parte en 10 millones. Una vez más, nos hallamos frente a un pequeñísimo efecto que requiere, sin duda, de técnicas experimentales muy delicadas y de observaciones muy precisas.

A principios de los setentas, Shapiro usó el eco del radar sobre el planeta Venus para comprobar, por cuarta vez, las predicciones de la teoría general de la relatividad. Ello requiere conocer las distancias importantes con errores que no excedan de unos cuantos kilómetros. Tomada en cuenta la distancia astronómica entre la Tierra y Venus, lo anterior exige conocer las órbitas planetarias y aun la topografía de Venus con un detalle nunca antes alcanzado. A pesar de lo difícil de esta empresa, el esfuerzo se hizo y las mediciones del retraso temporal, cuyo error no excede unos pocos microsegundos, concuerdan espectacularmente con lo predicho por la teoría einsteniana. He aquí, pues, una cuarta prueba experimental de la gravitación relativista.

Pasemos ahora a discutir someramente esos nuevos objetos del universo, que posiblemente existan y que captan la atención de todos los amantes de la ciencia ficción hecha ciencia: los hoyos negros. Ya Laplace, el gran físico y matemático francés, sospechaba de su existencia: "... a consecuencia de su atracción, ese cuerpo no permitiría a ninguno de sus rayos escapar; es pues posible que los cuerpos luminosos más grandes del universo fueran, por esta causa, invisibles." Sin embargo, con la teoría de Einstein la existencia de estos cuerpos muy masivos —que no dejan escapar la luz, que curvan abruptamente el espaciotiempo, que ninguna información puede librarse de su influencia, que no se ven pues son negros— adquiere una nueva perspectiva.

Si usamos coordenadas polares (r, θ) , intervalo en el espaciotiempo se escribe así:

$$ds^2 = c^2 dt^2 - dr^2 - r^2 d\theta^2$$

En presencia de una masa m , el espacio tiempo se curva, aparece un tensor métrico $g_{\nu\mu}$ diferente que corresponde a un tensor de curvatura no nulo. En tal caso, Einstein nos dice que la fórmula anterior ha de modificarse y que ahora debe ser $ds^2 = \gamma(r) c^2 dt^2 - dr^2 - r^2 d\theta^2$, donde la función γ lo es sólo de la

distancia r a la masa m y vale $\gamma(r) = 1 - (2GM/c^2r)$. Cuando $2GM/c^2r$ es igual a 1, γ se hace cero y la métrica contiene infinitos, se vuelve singular como dicen los matemáticos. A este valor de r , R_S , se le conoce como el radio de Schwarzschild, y define un volumen del cual no puede salir la luz o ente alguno. Si m fuera la masa del sol, R_S valdría tres kilómetros y la densidad de este cuerpo sería inimaginablemente alta. Por ello, durante mucho tiempo no se tomó totalmente en serio a estos hoyos negros. No obstante, desde los sesentas empezaron a descubrirse nuevos objetos en el cielo. En 1967 se vio el primer pulsar que emite ondas de radio con gran regularidad. Se concluyó pronto que estos pulsares eran estrellas de neutrones, con masas del orden de la solar y una decena de kilómetros de radio, y que resultaban del colapso gravitacional de una estrella normal, cuando ésta moría al haber gastado su combustible nuclear. Tales objetos ya no estaban muy lejos de uno que cumpliera con la condición de Schwarzschild. El hoyo negro aparecía en lontananza...

Aunque el hoyo negro no puede verse, sus efectos sí son detectables. Supongamos que un hoyo negro forma una pareja con una estrella normal; por su gran atracción gravitatoria, el hoyo negro extrae materia de su estrella compañera. Ello produce fuertes emisiones de rayos X, que son característicos y que bien podrían ser la señal de que el hoyo negro anda por ahí. Muchos astrónomos creen que tales condiciones se dan en ciertas fuentes conocidas de rayos X, como la Cygnus X-1. Más aún, muchos piensan que existen hoyos negros gigantes en el centro de las galaxias pues, según las teorías astronómicas modernas, suponiéndolos se explicarían varias observaciones, como los chorros de gas ionizado que vemos en las radiogalaxias. Tal vez pronto sabremos si estos cuasares son también hoyos negros.

Los hoyos negros podrían formarse cuando una estrella muy masiva termina su evolución, después de haber explotado como una supernova. La formación de un hoyo negro supone, pues, enormes aceleraciones de masas muy grandes. Deberían, según Einstein, generarse entonces pulsos enormes de ondas gravitacionales. Esta ilusión de la física moderna no ha podido convertirse en realidad. Igual que el monopolio magnético o los cuarks, las ondas gravitacionales no han sido descubiertas aún. Sin embargo, casi ningún físico duda de su existencia y por ello las continúan buscando.

Toda teoría relativista de cualquier campo de fuerzas físico predice la existencia de ondas. El electromagnetismo requiere de ondas como la luz, y la gravitación relativista tiene sus propias ondas. No es difícil entender por qué, cuando nos damos cuenta de que la relatividad prohíbe la transmisión instantánea de señales. En el caso electro-magnético, por ejemplo, los campos pueden ser independientes del tiempo sólo si las cargas están en reposo o se mueven con velocidad uniforme. En la última afirmación está oculta la hipótesis de que la partícula ha permanecido en su estado de movimiento desde siempre y para siempre. Cualquier perturbación a él, es decir, cualquier aceleración que sufran las cargas ha de propagarse con velocidad finita, en forma de pulso que viaja con la velocidad de la luz c . Este es el origen de las ondas electromagnéticas que se producen cuando aceleramos una carga eléctrica. Tales ondas surgen de inmediato de una teoría relativista de los campos eléctricos y magnéticos, como es la de Maxwell. De sus ecuaciones emerge la ecuación de ondas y de ahí las importantes consecuencias tecnológicas que todos atestiguamos día con día.

Como las ecuaciones de campo de Maxwell llevan a la existencia de ondas electromagnéticas, así las ecuaciones de campo de Einstein predicen las ondas gravitacionales. Las primeras implican oscilaciones de los campos eléctricos y magnéticos, las gravitacionales son alteraciones de la geometría del espaciotiempo. Cuando una carga eléctrica se acelera se produce un pulso de luz, un chorro de fotones. En igual forma, al acelerar una masa, fuente del campo gravitacional, se produce un pulso de ondas gravitacionales, un chorro de gravitones. A semejanza de las electromagnéticas, las ondas de Einstein llevan con una velocidad c la información de que algo ha ocurrido; c es la máxima velocidad permitida. Pero a diferencia de las ondas de luz, las gravitacionales son muy débiles. Esto se debe a que la fuerza gravitacional es mucho menos intensa que la eléctrica, como sabemos, pues la constante de la gravitación universal G es pequeñísima. Por ello, habrá que esperar a que masas enormes sufran aceleraciones gigantescas, como en la formación de un hoyo negro, para poder detectar esas ondas gravitacionales.

Aparte de su debilidad relativa, existe una diferencia más entre los dos tipos de ondas. En el caso eléctrico

podemos generar ondas periódicas haciendo oscilar una carga positiva y una negativa en fase opuesta, una contra la otra; esto es lo que llamamos la radiación dipolar. El dipolo, conjunto de dos cargas de signo opuesto, es el radiador electromagnético básico. Empero, la gravitación es diferente, pues no hay masas de signo opuesto. Aunque no sepamos por qué, el principio de equivalencia impone masas de un solo signo. No es posible, en consecuencia, producir un dipolo oscilante que radie ondas gravitacionales. Según se deduce de la teoría einsteiniana, el radiador básico es ahora lo que se conoce como un cuadrupolo. (En el lenguaje cuántico, tal diferencia entre los dos tipos de ondas se expresa así: los cuantos de luz, los fotones, tienen espín $\hbar/2\pi$, donde \hbar es la constante de Planck; los cuantos de la onda gravitacional, los gravitones, por su parte, tienen espín $2(\hbar/2\pi)$, el doble del fotón.)

Es interesante, llegados a este punto, mencionar que los físicos no se han dormido en sus laureles desde 1916, cuando Einstein publicó su teoría general de la relatividad. Muchas otras ideas sobre la gravitación han generado otros científicos; algunas de estas teorías predicen efectos distintos a la de Einstein. En particular, se cree hoy que toda teoría relativista de la gravitación debe ser una teoría métrica, es decir, que sus ecuaciones deben caracterizar $g_{\nu\sigma}$. Se conocen varias de estas teorías métricas, además de la general de la relatividad. En cuanto a las ondas gravitacionales, sólo la última lleva a la conclusión de que el cuadrupolo es el radiador básico. Por ello, resulta de la mayor importancia detectar las ondas gravitacionales, pues con ello sabríamos cuál idea sobre la gravedad, de las varias hoy posibles, se acerca más a lo que observamos.

Con estos preámbulos, relatemos los esfuerzos recientes para detectar las ondas de Einstein, esfuerzos que son herederos directos de los que Weber y sus colaboradores realizaron hace ya veinte años, cuando creyeron detectar por primera vez las ondas gravitacionales. Por cierto, todavía hoy no sabemos con certeza cuál fue el fenómeno que Weber observó.



XXIII. LOS NUEVOS EXPERIMENTOS

LA BÚSQUEDA de las ondas gravitacionales ha continuado desde que Weber la inició, allá por 1968. De 1975 a la fecha, al menos una docena de antenas gravitacionales se han construido en diversas partes del mundo. Todas ellas representan mejoras sobre el aparato original que se instaló en Maryland y Argonne y, todas ellas, operan a la temperatura ambiente. Por esto último se les conoce como antenas de la primera generación, a diferencia de aquellas de la segunda generación, que operan a muy bajas temperaturas, como la temperatura del helio líquido. Las antenas gravitacionales se han montado en Estados Unidos, Inglaterra, Japón, la U.R.S.S. y en Roma, esta última como resultado de un esfuerzo germano-italiano. Es interesante notar que de los seis aparatos montados en los Estados Unidos, cinco lo han sido en la IBM y en los Laboratorios Bell, grandes laboratorios industriales. He aquí una bella muestra de cómo la ciencia más básica interesa a las industrias de avanzada que no ignoran los beneficios tecnológicos que obtendrán de las investigaciones de frontera. ¡Qué gran contraste con la miopía de los consejos de investigación burocratizados del Tercer Mundo!

Buscar ondas gravitacionales implica siempre una paciencia enorme. En uno de los últimos informes de los Laboratorios Bell, publicado en el *Physical Review* en 1982, Brown y sus colaboradores reseñan los resultados que obtuvieron luego de observar durante ¡440 días! con un detector de aluminio de casi cuatro toneladas de peso. Respecto al aparato original de Weber, mejoraron el aislamiento, la razón de ruido a señal, y se ha observado en tiempo real, usando los nuevos sistemas de microcomputadoras. En esos largos catorce meses, los físicos estadounidenses vieron tan sólo un gran evento, que no fue observado por la antena, mucho más sensible, de la Universidad de Stanford. Sin embargo, su experimento sirvió para imponer el límite más bajo, con antenas de la primera generación, de 5×10^{-3} eventos por día, para la llegada de ondas gravitacionales. Un ritmo tan lento es de esperarse, pues las teorías actuales predicen que pulsos intensos y de cierta duración se producirían al explotar una supernova en nuestra galaxia, la Vía Láctea. Y sabemos, al extrapolar lo que se sabe de ellas, que en nuestra galaxia explota una supernova en un lapso que fluctúa entre 10 y 30 años.

En las antenas de la segunda generación, aquellas enfriadas por helio líquido, se busca reducir el ruido térmico y así aumentar la sensibilidad del aparato. Para aumentar esta última, se requieren cuatro propiedades de la antena, no siempre compatibles. Se debe, en primer lugar, tener una antena masiva, mientras más pesada mejor; se requiere, también, un alto factor de calidad Q , es decir, que el número de oscilaciones de la antena sea muy grande antes de que su energía decaiga; la tercera característica de una buena antena gravitacional es que esté fuertemente acoplada a los aparatos de registro electrónico y finalmente, que su temperatura sea baja. Diversos grupos de investigación han construido antenas con distintos materiales, siempre buscando las mejores características. Así, en Stanford y en Roma se ha utilizado aluminio para construir el gran cilindro; se pueden tener masas de hasta 6 toneladas, pero el factor Q es modesto. En Moscú se ha empleado un cilindro de zafiro que, aunque ligero, tiene una Q muy alta. Otros grupos usan niobio, que puede ser flotado por medio de la superconductividad y, otros más, ensayan con aleaciones de aluminio que recién han descubierto los japoneses. Todos los grupos buscan, por otro lado, mejorar sus diseños electrónicos y lograr unos transductores más sensibles.

No sólo con antenas mejoradas tipo Weber se trata de hallar a las ondas gravitacionales. Se han diseñado muchos otros experimentos para detectarlas, entre ellos sobresalen dos: el corrimiento Doppler producido en ondas de radar que rebotan de una nave espacial y los interferómetros láser. El primero de estos métodos parecería sacado de la ciencia ficción. Una onda gravitacional produce ligerísimos movimientos relativos entre la Tierra y la lejana nave espacial interplanetaria. Ello produce fluctuaciones del radar en el corrimiento Doppler por un mecanismo semejante al descrito en el Capítulo XIX. Para estar seguros de que el corrimiento en la frecuencia del radar se debe a efectos gravitacionales, hay que descartar los cambios en el índice de refracción del plasma interplanetario y en la troposfera de la Tierra, así como fluctuaciones en la frecuencia del reloj que manda los pulsos de radar. También la presión sobre la nave que causan el viento solar y la radiación electromagnética, así como los escapes de gas, producen

pequeños efectos que alteran la posición del vehículo espacial. Todas estas fluctuaciones se pueden estimar y el experimento podría detectar el paso de una onda que afecte la geometría del espaciotiempo. En febrero de 1983 se puso en camino la Misión Solar-Polar Americana, que llegó a Júpiter catorce meses después y sobre el polo del Sol en noviembre de 1986. Con esta misión, tal vez será capaz el hombre de detectar finalmente las elusivas ondas einstenianas.

En la técnica de interferometría láser, se colocan tres masas de prueba en la esquina de un triángulo rectángulo. Las masas se cuelgan como péndulos que, para frecuencias muy altas comparadas con la frecuencia natural del péndulo, oscilan libremente en la dirección horizontal. Si una onda gravitacional cruzara este arreglo experimental, juntaría dos de las masas a lo largo de un cateto del triángulo, pero separaría las dos alojadas en el otro cateto. Rebotando luz láser una y otra vez en las masas pendulares se pueden medir los efectos de la onda gravitacional. Si el ruido que causan las fluctuaciones en la frecuencia del láser, las vibraciones sísmicas, el ruido térmico en los soportes pendulares, los cambios azarosos en el índice de refracción del gas residual que queda en el interferómetro y algunas otras fuentes de error pueden tomarse en cuenta, se alcanzaría la alta sensibilidad requerida. En ello trabajan muchos físicos que han logrado ya operar un aparato como el descrito. Este, aunque muy complejo, no ha alcanzado la fineza deseada todavía.



XXIV. EPÍLOGO

CUANDO los astrónomos disponían sólo de sus ojos, como en los tiempos de Tycho Brahe, e incluso después con sus telescopios ópticos, la imagen que el hombre se fue formando poco a poco del universo era de quietud y perfección. Luego de la segunda Guerra Mundial, nuevas ventanas electromagnéticas se abrieron, una tras otra: la radioastronomía, la de los rayos X, la astronomía del infrarrojo y del ultravioleta e incluso la de rayos γ . También comenzó la astronomía de rayos cósmicos. La visión calma, platónica, de los cielos y su perfección fue quedando atrás. Vimos galaxias que explotaban, cuasares y pulsares, estrellas neutrónicas y supernovas y los hoyos negros aparecían en lontananza. Hoy, tenemos la ilusión de abrir dos nuevas ventanas al cosmos, la de las ondas gravitatorias y la astronomía de neutrinos.

Las ondas gravitacionales son consecuencia inevitable de cualquier teoría relativista de la gravedad. La teoría general de la relatividad de Einstein predice su existencia y casi todos los físicos creen en ellas. Para detectar esas ondas, que producen efectos minúsculos como son todos los de origen gravitacional, se requiere el esfuerzo combinado de físicos dedicados a entender mejor la teoría gravitacional, de grupos interdisciplinarios que mejoren día con día las técnicas de detección y de astrofísicos y astrónomos que identifiquen la fuente de las ondas y, de la forma de éstas, descifren nuevas propiedades del cosmos. El trabajo conjunto de todos estos científicos podría pronto alcanzar el éxito, más ahora cuando se acaba de descubrir la explosión de una supernova.

Las ondas gravitacionales son útiles por varias razones. Primero, cruzan impunemente la materia, a diferencia de las ondas electromagnéticas que la materia absorbe fácilmente y de los neutrinos que pueden chocar muchas veces en su camino hacia nosotros. Por otro lado, las ondas de Einstein se originan en aquellas regiones del espacio donde la gravedad es más intensa y donde la velocidad de la materia se acerca más a la de la luz. En tales zonas del universo tienen lugar sus fenómenos más violentos —como la explosión de supernovas o los cuasares— de los cuales poca información directa tenemos. Si detectamos las ondas gravitacionales habremos de aprender mucho, por tanto, de la estructura de nuestro universo. Hasta el día de hoy, unos cuantos meses después de haber explotado la supernova del siglo XX, los físicos y astrónomos no han detectado las ondas einstenianas, aunque se da por seguro que algún día, no muy lejano, lo harán con sus nuevos detectores, cada vez más sensibles y precisos.

He nos aquí, pues, con la electrónica, la óptica y la ciencia de los materiales tomadas de la mano para medir pequeñísimos desplazamientos y así convertir en realidad una más de las grandes ilusiones de la física moderna. El por qué de todos los esfuerzos que se han hecho es claro: no sólo quedará un conocimiento más profundo de nuestro universo, sino también la cauda de nuevas tecnologías que deja atrás la búsqueda de las ondas gravitacionales es muy importante.

Por todo ello, los físicos siguen buscando...



IMÁGENES DE ALBERTO EINSTEIN



El padre, Hermann Einstein, y la madre, Pauline; ambos de origen judío, aunque alejados de las tradiciones religiosas. Su padre dirigía un pequeño negocio de aparatos electrónicos.



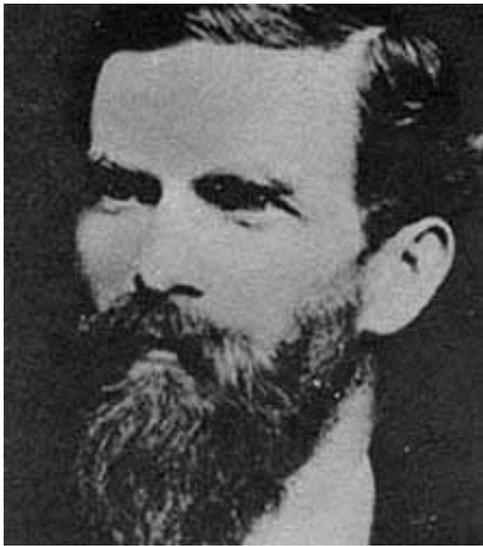
El joven Einstein hacia 1895, año en que su familia parte a Milán. Italia, país del arte, lo impresionó vivamente y la recorre a pie, de Milán a Padua, de Padua a Florencia...



La casa natal de Einstein en Ulm. Ahí nació el 14 de marzo de 1879, cerca del Danubio. Un año después, la familia Einstein partiría hacia Munich, donde permanecerían cerca de 15 años.



Einstein y sus condiscípulos en Aarau. Cuando se decidió que estudiara en Zurich, al no haber obtenido un diploma universitario en Alemania, debió presentar exámenes de admisión en la Escuela Politécnica. Aunque aprobó brillantemente en física y matemáticas, sus conocimientos en lenguas clásicas no fueron suficientes. Fue entonces que estudió en Aarau.



Heinrich Friedrich Weber. Hermann Minkowski.

Finalmente, ingresa a la Politécnica de Zurich, donde enseñaban Weber y Minkowsky. Su curiosidad es insaciable: descubre y se maravilla con Galileo, Newton, Maxwell, Boltzmann...



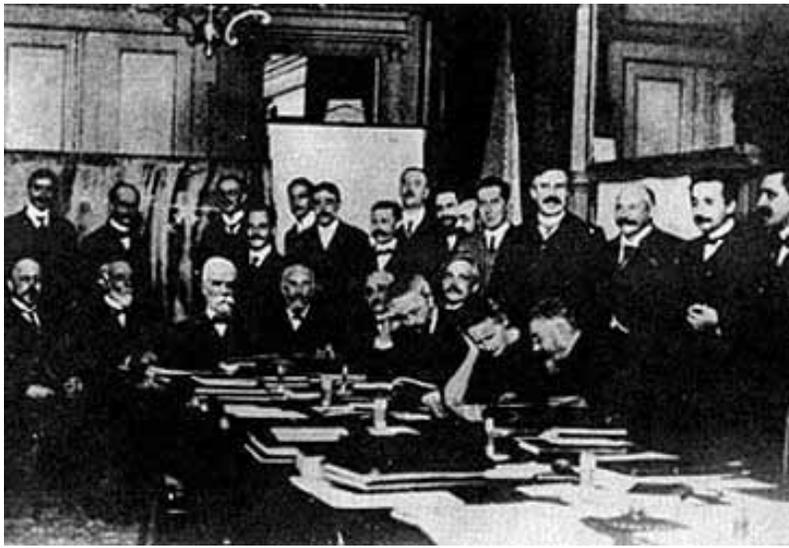
En aquella época se casa con Mileva Maric, antigua condiscípula suya en la Politécnica de Zurich. Su primera mujer es taciturna, reservada. Procrean dos hijos, Albert y Eduard.



Las autoridades de la Escuela Politécnica de Zurich no cumplen su promesa: Einstein no consigue el puesto de ayudante de profesor y debe ir a trabajar a la oficina de patentes de Berna. Es ahí donde elabora lentamente su revolución científica.



Mesa en que trabajaba Einstein en 1905, año en que publicó sus famosos trabajos sobre el movimiento browniano, el efecto fotoeléctrico y la teoría especial de la relatividad. Von Laue, físico famoso, va expresamente de Berlín a Berna para conocer a Einstein. El ilustre Lorentz lo invita a Leyden a hablar de su trabajo. En fin, Einstein comienza a ser famoso.



Regresa entonces a la vida académica oficial. Trabaja en la Universidad de Zurich y, poco después, en 1910, va a enseñar a la Universidad de Praga. En 1911 nace, financiado por un rico industrial belga, Ernesto Solvay, el Congreso Internacional de Física Solvay. En el Congreso se reunían los científicos más destacados del momento, para discutir los problemas más ardientes. En la foto, se encuentran Marie Curie, Poincaré, Langevin, Rutherford, Lorentz, Plank, Nernst y entre ellos Einstein.



Deja luego Praga y regresa a Zurich, como profesor de la Politécnica que años antes le había retrasado su admisión. Apenas llegado allí, el káiser Guillermo II, emperador de Alemania, envía a Nernst y a Plank para ofrecer a Einstein una cátedra en Berlín y la membresía en la Academia de Ciencias de Prusia. Se separa de Mileva y contrae matrimonio con Elsa, quien habría de ser su compañera en el periodo más glorioso y terrible de su vida.



Poco después de la llegada de Albert Einstein a Berlín, estalla la primera Guerra Mundial. Einstein, pacifista por instinto, se opone al militarismo alemán. Su ciudadanía suiza lo libra de ser considerado traidor.



Walter Nernst. Max Planck.

En Berlín Einstein se encuentra con una constelación de físicos de primera magnitud: Walter Nernst, quien enunció uno de los principios de la termodinámica, y Max Planck, el creador de la mecánica cuántica, eran los principales.



Entre sus colegas más notables de aquella época se alza Niels Bohr, líder de la física danesa y creador de la Escuela de Copenhague para la interpretación de la teoría cuántica. Con él sostuvo Einstein una polémica, aún actualmente no resulta.



A pesar de las acciones de guerra y de sus preocupaciones pacifistas, Einstein continuó trabajando. Hacia 1916 enuncia los principios fundamentales de su teoría de la gravitación: la teoría general de la relatividad, cuyas predicciones habrían de ser corroboradas durante el eclipse solar de 1919. Para otras confirmaciones de la teoría se crea esta Torre Einstein, sede de un Instituto de Astrofísica.



Ya como científico de gran fama, Einstein viaja por doquier. En Nueva York se le recibe como si fuera un ídolo deportivo, y es asaltado por reporteros y cineastas. Estos viajes, aunque interrumpían sus trabajos, le permitían reencontrarse con sus viejos amigos y pulsar la existencia de esa comunidad de hombres de ciencia, que existe independientemente de las fronteras.



Así como en 1919 retoma la nacionalidad alemana por solidaridad con el pueblo vencido, manifiesta después su identidad con la comunidad judía. Acompaña en una gira de conferencias al líder del sionismo, Chaim Weizmann.



Con el poeta Rabindranath Tagore, en 1930.



Einstein, en la época en que recibió el premio Nobel de física, por sus estudios sobre el efecto fotoeléctrico realizados en 1905. Para explicar la expulsión de electrones al incidir la luz sobre ciertos materiales, Einstein propuso que la luz estaba formada por fotones.



Con Elsa, su mujer, y con su nueva nuera en 1929, año en que cumplía 50 años. Ya se erguía sobre Alemania el fantasma de Hitler y el fascismo. Poco después renuncia a la Academia de Ciencias de Prusia, fija su residencia provisionalmente en Bélgica, hasta aceptar finalmente un ofrecimiento del Instituto de Estudios Avanzados de Princeton.



Se embarca con su mujer hacia los Estados Unidos en 1932. En Princeton pasaría los últimos 20 años de su vida, trabajando con cierta paz sobre la teoría del campo unificado. Poco después de su llegada a Princeton muere su mujer.



Desde su cubículo en el Instituto de Estudios Avanzados, Einstein ve desarrollarse los eventos que llevaron a la segunda Guerra Mundial. Es por aquellos tiempos que escribe la famosa carta del 2 de agosto de 1939, dirigida al presidente Roosevelt, en la que le ponía al corriente de los trabajos de Szilard y de Fermi: nace entonces el proyecto Manhattan. "De hecho, diría él más tarde, yo sólo serví de buzón. Me llevaron una carta ya escrita, y yo la firme. Si hubiera sabido que los nazis no lograrían fabricar la bomba antes que los aliados, yo me hubiese abstenido." Las circunstancias terribles forzaron al pacifista Einstein a impulsar la fabricación de la bomba atómica.



Ya cerca del final de su vida, con su figura bohemia, su suéter mal ajustado, su melena blanca y alborotada, Einstein pasea por los jardines de Princeton. Sus últimos diez años los consagró, por una parte, a seguir sus trabajos sobre la teoría del campo unificado y, por otro lado, a luchar porque el secreto de la bomba atómica fuera descubierto a los soviéticos y a tratar de establecer un gobierno mundial. Antes de lograr esto, muere en 1955, víctima de un mal de la vesícula biliar.

Indice





COLOFÓN

Este libro se terminó de imprimir y encuadernar en el mes de agosto de 1997 en los talleres de Impresora y Encuadernadora Progreso, S.A. (IEPSA), calzada de San Lorenzo 244, 09830 México, D.F.

Se tiraron 3 000 ejemplares

La Ciencia para Todos

es una colección coordinada editorialmente por *Marco Antonio Pulido* y *María del Carmen Farías*



Hasta fechas relativamente recientes la imagen que el hombre tenía del Universo era de quietud y perfección. En los tiempos actuales tal concepción se mira ya sólo como un recuerdo amable.

En épocas de cambio acelerado se aventuran hipótesis o predicciones —por supuesto con una sólida base matemática o teórica—, algunas de las cuales pronto encuentran su comprobación experimental. Por ejemplo, Paul Dirac predijo en 1930 la existencia de una antipartícula de electrón, a la que llamó positrón, la que fue descubierta dos años más tarde por Carl Anderson.

En otros casos la comprobación es más lenta: eso sucedió con las ondas gravitacionales cuya existencia fue formulada por Einstein en su teoría general de la relatividad y que "son alteraciones de la geometría del espacio-tiempo" que se producen al acelerar una masa, fuente del campo gravitacional. A diferencia de las ondas de luz, las ondas gravitacionales son muy débiles puesto que la fuerza gravitacional es mucho menos intensa; de hecho la física moderna considera que la constante de la gravitación universal —representada por G — es pequeñísima. Aunque casi todos los físicos creen en su existencia, hasta ahora no han podido ser descubiertas aunque se haya creído aislarlas en más de una ocasión.

El doctor Jorge Flores trata en este volumen sobre esta "gran ilusión" de la ciencia moderna como ya lo ha hecho con otras dos: el monopolio magnético y los cuarks en otros volúmenes de esta colección. Considera de extrema utilidad descubrir y analizar las ondas gravitacionales por las propiedades que les atribuye: atravesar limpiamente la materia y originarse en aquellas regiones del espacio donde la gravedad es más intensa y donde la velocidad de la materia se aproxima a la de la luz, zonas del Universo donde tienen lugar sus fenómenos más violentos, como la explosión de las supernovas.

Jorge Flores Valdés obtuvo el doctorado en física en la UNAM en 1965. Fue investigador asociado en la Universidad de Princeton. Es investigador del IFUNAM, del cual fue director de 1974 a 1982, fue subsecretario de Educación Superior e Investigación Científica de la SEP. Desde 1988 es director de *Universum*, el Museo de las Ciencias de la UNAM. Ha recibido, en 1972 el Premio de Investigación de la Academia Mexicana de Ciencias, el Premio Universidad Nacional en 1988 y el Premio Nacional de Ciencias en Investigación en Ciencias Exactas y Naturales en 1994. La UNESCO le otorgó en 1992 el Premio Kalinga de Popularización de la Ciencia. Es autor de 130 artículos y 11 libros.

