

## La teoría de la relatividad

CUANDO me arriesgo a esbozar, en media hora y ante un público no especialista, la teoría de la relatividad de Einstein, y cuando abrigo la esperanza de poder propalar toda la esencia de la teoría, abarcando algo de sus orígenes históricos, de sus bases científicas, de su estructura deductiva, de las conclusiones a que llega —y algunos de sus pronósticos ya verificados o por someterse aún al veredicto de una experiencia futura—, me siento agobiado por la perspectiva de una tarea sobrehumana. Y no es que yo participe de la opinión emitida por el periodismo de que, en todo el mundo, sólo existan una docena de personas que hayan entendido a Einstein, yo estoy seguro de que la legión de los conocedores de su teoría de la relatividad cuenta por muchos miles; el inconveniente para mí está, más bien, en la necesidad de preparar la explicación de sus ideas, enseñando conocimientos tan vastos que ni varias horas de conferencia bastarían para ello. Ante esta dificultad, se me ocurre, como único recurso, valerme del parangón con alguna situación que es de dominio común, aun cuando, en este mundo, no existe paralelo perfecto.

La ciencia física con sus muchas disciplinas constituyentes divergentes, si bien son de bases teóricas comunes, puede compararse con la edificación de una ciudad. A primera vista observamos en ella una multitud de formas de las casas; y, sin embargo, ostentan rasgos comunes. Los fundamentos, desde luego, de todos los edificios modernos se parecen entre sí. Es verdad que en la ejecución de la obra podemos notar ya más variedad, y el número de pisos deja, hoy día, la impresión de ser ilimitado. Es comprensible que nos formemos

la idea generalizada, exagerada, de que lo que conocemos de nuestra ciudad de Santiago podría verse, con diferencias de grado —es decir en forma tanto amplificada, tanto disminuída—, en toda metrópoli del mundo. ¿Nos atreveremos agregar la convicción audaz de que aun generaciones futuras construirán en forma parecida? Entiendo que está demás contestar.

Veamos ahora la Física. Los edificios de la teoría del calor, de la mecánica, de la acústica y del electromagnetismo son de aspectos bastante diferentes entre sí; ellos se valen, no obstante, de nociones básicas comunes, como ser longitud, masa, tiempo, velocidad, etc. Cada uno de los físicos especialistas se esfuerza por añadirle nuevos pisos superiores a su edificio científico particular, y no se preocupa normalmente de la estructura fundamental que él ha heredado de sus antecesores, ni se imagina, muchas veces, que en otras partes del orbe o en otras épocas podría la humanidad usar principios diferentes de los que usa él. Tal convicción inveterada de la universalidad y perpetuidad de las leyes del conocimiento, ha encontrado su condensación en las categorías de Kant, en su noción de espacio, de tiempo y de causalidad. Y cuando, al encaramarse nuevos pisos superiores en una construcción científica ya de por sí elevada, se noten fallas en su estructura, no piensan los hombres de ciencia, luego, en reemplazar los cimientos por otros, fundamentalmente nuevos, sino que, generalmente, tratan de parchar la parte expuesta a peligro. Un cambio eventual de los fundamentos obligaría, en realidad, a desmantelarlo todo, y, ¿estamos acaso seguros de que el edificio, sobre sus nuevos cimientos, quede tan bello como lo era antes?

Efectivamente, se hallaba, a fines del siglo pasado y a principios del siglo XX, la ciencia física en apuros innegables en varias de sus ramas. Grandes dificultades en la interpretación de la radiación térmica indujeron a Max Plank, en el año 1900, a la creación de su cuanto de acción  $h$ , y por ende, a una concepción atomística de la energía. Y en 1905, fué Albert Einstein el que dió el toque final a aquella obra de Plank, con la invención de los fotones, los átomos de la luz; construcción atrevida, puesto que hasta entonces la luz se había considerado como un puro fenómeno ondulatorio, luego continuo, de manera alguna discontinuo como lo postulaba Einstein. Significa el descubrimiento de Einstein una ruptura radical con ideas que eran corrientes entre los físicos de aquel tiempo; no representa ya un remiendo ocasional de falla localizada, más bien inicia un movimiento de renovación de los fundamentos de la Física, movimiento continuado y llevado a una terminación provisoria en 1925 por De Broglie, Dirac, Schrödinger y Heisenberg. Y esto caracteriza al genio de Einstein: intrépido y sincero, no se conforma con soluciones parciales, contingentes, sino ataca el mal por la raíz, aun produciéndoles dolores agudos a los rutinarios.

En el mismo año 1905 publica Einstein su teoría de la relatividad, en la forma llamada más tarde teoría especial; y entre 1915 y 1921 agrega su teoría generalizada. Un rasgo epistemológico, común a ambas teorías, se manifiesta en la dura prueba de resistencia a que somete a todos los estudiosos, menos por el formalismo matemático complicado, que suele ser un escollo serio, cuando menos en la teoría generalizada, sino por la exigencia implacable de sacrificar conceptos familiares, por el requerimiento perentorio de substituirlos por otros nuevos insólitos, que a primera vista hasta parecen paradójicos. Los mencionaremos a continuación, aun cuando su explicación detallada debe, necesariamente, postergarse hasta las conferencias especializadas de las semanas que vienen.

Empecemos por el concepto de tiempo, concepto que desempeña un papel central y bien novedoso en la teoría de Einstein. Previa a la medición de intervalos de tiempo es la fijación de la simultaneidad.

De dos acontecimientos que ocurren en mi presencia, para decirlo así, al alcance de

mi cuerpo, no tengo dificultades en decidir si son simultáneos o no. Cambia, sin embargo, la situación y se pone ardua cuando se trata de decidir, por ejemplo, cuál de dos leñadores, alejados de mí y distantes entre sí, da el primer hachazo. Desde luego, no me gustaría guiarme por el sonido que es muy lento recorriendo sólo 330 mts. por segundo. Daría preferencia al sentido de la vista, por la convicción de que veo el suceso en el mismo instante que se produce. Más aún, la luz tiene una velocidad finita, demora 1 segundo en recorrer 300.000 kmts., 8 minutos en llegar del sol a la tierra. Vemos que el problema se agudiza para la astronomía con sus enormes distancias. Acontece a veces que en el firmamento aparece una estrella desconocida, una "nova", resultado de una catástrofe cósmica. Podríamos imaginar que dos novas aparecieran simultáneamente en el cielo visible, eso sí en lugares distantes entre sí. ¿Podríamos afirmar realmente que las dos han nacido en el mismo momento? Para un observador terrestre podríamos llegar a tal conclusión, descontando debidamente los tiempos que demoró la luz en llegar hasta nosotros, suponiendo conocidas las distancias de ambas. Pero para un observador en otro astro, el resultado podría ser diferente; aún para nosotros existiría la duda de si la luz viajaría igualmente rápido en las dos trayectorias. Pues, no estamos ni siquiera seguros de que la tierra y las dos estrellas constituyen un sistema invariable, podrían moverse una respecto de la otra. Demasiado estamos acostumbrados a una física estática, a la física del laboratorio modesto, pero sólido, en que no hay movimientos incontrolables, en que todo se hace con calma, a ritmo moderado. Pero hoy día la realidad corresponde muy poco a este ideal de "Gemütlichkeit", como se dice en alemán; una gran parte del universo, tanto en lo microscópico como en lo astronómico, consulta movimientos bruscos, produciéndose grandes cambios de posición en pequeñísimos intervalos de tiempo. Parece que los tiempos modernos tienen la tendencia de ofrecernos el tiempo sólo partido en tajadas delgadísimas, en vez de brindarnos, a ratos, un buen trozo grueso, a que tanto anhelamos. Los fragmentos de tiempo que nos sirven, parecen salir de una máquina cortadora de fiambres o, aún, de un micrótopo.

Pues bien, Einstein nos enseñó que la noción de simultaneidad es una mera noción local, ligada al observador, al sistema de referencia. No es noción universal como los físicos, encerrados en su pequeño laboratorio, lo afirmaban, a raíz de una extrapolación atrevida, ilícita. De ahí se colige luego que toda la noción de tiempo ha de ser local, que el tiempo físico no es un fenómeno universal, corriendo en todas partes igual. Volviendo a nuestro parangón: que el modo de construcción de Santiago no es norma para la del mundo entero. ¿Cómo llegó Einstein a concebir este cambio radical? A la física de aquella época le preocupaba una controversia entre la electrodinámica creada por Maxwell y la mecánica clásica de Newton, teorías ambas centrales en la física, y que, sin embargo, se oponían hasta cierto grado, por incongruencias en el caso de movimientos rápidos, incongruencias que llevaron a los físicos a utilizar un truco mental bastante raro, llamado la contracción de Lorentz.

En realidad, cuando dos teorías se hallan en oposición lógica, no cabe sino retirar o, al menos, modificar una de ellas, dejando a la experimentación posterior el cuidado de decidir si ha sido ésta la que debía sacrificarse y si la modificación ha sido prudente. En aquel caso habían optado algunos físicos por alterar los enunciados de la electrodinámica, introduciendo en ella una ficción: respecto del electromagnetismo, se portaría, según ellos, el espacio como si experimentara una contracción longitudinal no prevista por la mecánica. Con tal contracción, llamada de Lorentz, se introdujo en la electrodinámica un elemento "als ob" muy poco convincente. Y otro inconveniente grave lo originó en aquellos tiempos la noción del "éter universal", al que se consideraba como el portador del campo electromagnético. Esta noción, a la que la teoría de la relatividad le asestó un golpe mortal, me parece digna de dedicarle algunas palabras "in memoriam". Cuando los físicos se habían enterado de que el espacio podía tener propiedades eléctricas o magnéticas, aún en ausencia de toda materia; cuando se supo que hasta ondas electromagnéticas podían existir en el vacío absoluto, trataron de buscar un ente hipotético portador. Pues no sabían imaginarse que una onda podía existir sin que algo oscilase, sin que

el predicado "vibrar" tuviese un sujeto real. Evidentemente, se hallaban bajo la influencia de los gramáticos de antaño que nos querían enseñar que una oración completa sin sujeto es imposible. De hecho afirmaban siempre que una frase, como "llueve" o "tiembla", tiene un sujeto subentendido, suprimido elípticamente; según ellos, debería decirse correcta y completamente: "San Isidro llueve". Mientras tanto la lógica moderna nos ha librado de semejantes prejuicios. Pero a principios de nuestro siglo, el éter daba todavía mucho que pensar a los hombres de ciencia. De existir —y su existencia no se ponía en duda—, debía o moverse con la tierra, estando en reposo respecto a ella, o quedar adherido en algún otro sistema del Universo. De todas maneras, la velocidad conocida de la luz podía medirse sólo respecto a un éter en reposo. Respecto de algún astro que se moviera en el éter, debería medirse una velocidad distinta de la luz, igual como el sonido se propaga con distintas velocidades respecto a un vehículo en movimiento o un instrumento en reposo. Pero experimentos realizados adrede por Michelson y de gran precisión, habían frustrado la expectativa de verificar un "viento del éter", indicando más bien que la velocidad de la luz, en el vacío, era la misma respecto de cualquier sistema de referencia. Tal hecho estaba en pugna con la cinemática clásica de Newton.

Pues bien, las dificultades las resolvió Einstein, ya no tratando de adaptar la electrodinámica, por medios más o menos artificiosos y contingentes, sino por la modificación radical de la mecánica de Newton, despojando el tiempo de su papel de independiente y refundiendo las tres dimensiones espaciales con la cuarta, temporal a un solo espacio-tiempo —este es el nombre que usó Einstein—, o al "universo", como más tarde lo llamara Minkowski. Cuando ahora propongo que mis estimados oyentes traten de hacerse una idea intuitiva de un tal espacio de cuatro dimensiones, temo encontrarme con una rebeldía abierta. Afirman Uds. que sólo se pueden imaginar un espacio tridimensional. Yo les contestaré que es por falta de costumbre únicamente, que podríamos perfectamente adquirir una familiaridad tal con el espacio cuadrimensional que supiéramos resolver sus problemas intuitivamente. Pero como

sería ilusorio aspirar a una familiaridad de esta índole, después de un estudio de cortos minutos, prefiero demostrarles que ni siquiera poseen Uds. la intuición de las tres dimensiones de la que tanta gala se suele hacer. En un cubo hueco consideremos dos vértices opuestos, de los cuales uno imaginaremos apoyado en la mesa, el opuesto sostenido con un dedo perpendicularmente sobre el primero. Ahora cortemos todo el cubo por un plano ecuatorial, es decir horizontal, a media altura entre los dos vértices prefijados. Preguntaré: "¿Qué figura de intersección obtendremos?" Todavía les puedo revelar que debe tratarse de un polígono cerrado plano. Ahora, no me admiraría de manera alguna si nadie entre Uds. —que no conociera el problemita— intuyera el resultado: se obtiene un hexágono regular. Es que vivimos más bien en el mundo de *dos* dimensiones de nuestra retina o de la geometría plana de las páginas de los libros, y sólo por un estudio detenido y concienzudo podremos llegar a intuir eventualmente las tres dimensiones. En estas condiciones, ¿subsistirá la barrera invencible delante de la cuarta dimensión?

El estudio de la geometría de cuatro dimensiones que propone la teoría de la relatividad, no podría hacerse sin fórmulas matemáticas, de las que le dispensaré. Prefiero ilustrar la hazaña inaudita de la solución que dió Einstein a nuestro problema, dando a conocer algunas reacciones de sus contemporáneos y algunas consecuencias lógicas. Lo que desde un principio abundó fueron los malentendidos, las interpretaciones erróneas de carácter filosófico, biológico, económico o artístico de aquellos que sólo leyeron la palabra "relativo" y hallaron luego que la relatividad de las cosas, era para ellos un hecho común. Entre los físicos, por otra parte —que no podían menos de estudiar la teoría—, se produjo una resistencia enconada de algunos rutinarios que no estaban dispuestos a abandonar sus prejuicios e ideas familiares que la nueva teoría exigía se sacrificaran. Pero irresistiblemente se impuso la aceptación paulatina por los físicos de buena voluntad y de cierta inteligencia mínima, aceptación que, por fin, se extendió a todo el mundo. La aceptación abarcó, aún, la llamada teoría general de la relatividad, publicada desde 1916, eso sí que con cierta

reticencia. Tanto es así que al otorgarse, al fin, el Premio Nóbel a Einstein, en 1922, lo obtuvo, según reza el tenor del pergamino, "por su teoría de la fotoelectricidad y demás trabajos en física teórica".

Mas, no nos anticipemos: tenemos que dar cuenta de varias consecuencias interesantes de la teoría especial de la relatividad, a cuyos detalles se referirán dos conferencias especializadas. Mencionemos primero la contracción de los cuerpos en el sentido longitudinal del movimiento, contracción fantasma antes de Einstein, y real, según él, para el observador en reposo. Mencionemos el atraso de los relojes en movimiento, observado otra vez desde el observador fijo. Mencionemos el aumento de la masa en movimiento, es decir, la substitución, en las fórmulas fundamentales de la dinámica, de la masa en reposo averiguada por medio de la balanza, por la masa impulsada, de valor numérico superior y tanto más grande cuanto la velocidad del movimiento se acerca a la de la luz. Destaquemos el hecho de que la velocidad de la luz es una velocidad límite, jamás alcanzada por movimiento material alguno. Y señalemos, finalmente, la grandiosa consecuencia, ineludible, de la teoría: la equivalencia de masa y energía expresada en la fórmula  $E = mc^2$ . Verdad es que cuando alguna energía de tamaño corriente se reduce a masa, resulta muy poco bulto; así, 250 kilowatt-hora equivalen a 0,01 miligramos. Pero, al revés, por supuesto, el contenido energético de la materia que nos rodea, es enorme. Cuando el hombre logra libertarla —como ocurrió con la bomba atómica—, puede obtener efectos gigantescos.

El físico matemático admira en la teoría especial de la relatividad su estética virtualmente perfecta. Celebra la liquidación definitiva de varios prejuicios muy comunes, tal como la posibilidad de hablar de velocidad absoluta, de encontrar un sistema de referencia privilegiado llamado "fijo". Mucho menguó, al fin, la presunción corriente de que los fundamentos de la física fuesen sólidos, en el sentido de inamovibles; así se puso sordina a la vanidad del hombre del siglo XX, que se creía ya dominador de la naturaleza y conocedor de todos sus misterios. No faltaron, tampoco, trastornos que se produjeron, con la nueva teoría, en los conceptos cosmogónicos. Pe-

ro, por suerte, dentro del laboratorio, en el dominio de las velocidades módicas, todo quedaba conforme. No se justificaba mayor alarma, ni menos se verificó lo que algunos ya estaban temiendo, que la física de Newton quedara sin valor alguno.

Pero: aún sobrevivía el espacio absoluto en su manifestación de la aceleración absoluta, del campo gravitacional; esta sobrevivencia le puso un problema mucho más duro a Einstein, y sólo después de largas preparaciones matemáticas y después de algunas intenciones de éxito sólo parcial, pudo resolverlo por sus publicaciones de los años 1915 a 21.

Por desgracia, me será totalmente imposible detallar los conceptos revolucionarios que con la teoría general surgieron. Yo mismo tendré que exponer este punto en días más, dentro del ciclo de conferencias especializadas que han de proseguir esta velada solemne que dedicamos a la memoria del mayor físico de la primera mitad del siglo XX. Aquel día tendré que hablar de la igualdad de la masa pesada, que medimos con la balanza, y de la masa inerte que interviene en la segunda ley de Newton. Deberé mostrar cómo esta coincidencia conocida por los físicos y, generalmente aceptada, pero no justificada, le dió la pista a Einstein para su mayor descubrimiento. Deberé explicar la curvatura del espacio de tres o de cuatro dimensiones, del espacio de Riemann; de la identificación de esta curvatura con la gravitación universal; tendré que hablar de la materia en interacción con su propio campo gravitacional, de cómo son abolidos los últimos vestigios del espacio absoluto y de sistemas de referencia privilegiados, de la unión íntima de mecánica y electromagnetismo. Muchas cosas sorprendentes para uno que otro de mis distinguidos oyentes tendré que mencionar, aún cuando la teoría de la relatividad, por su inclusión en la totalidad de los textos modernos de Física, debe considerarse hoy día como ciencia clásica. De hecho, como ya lo observé, dentro de las dimensiones del laboratorio y para velocidades moderadas, ella no significa cambio medible alguno. La enorme importancia

de los nuevos fundamentos de la Física resaltará sólo cuando transgredimos los límites de nuestra urbe científica, en camino hacia el nuevo mundo de los átomos y electrones con sus velocidades fantásticas, o hacia los confines de nuestra galaxia. De esto último tendremos ocasión de oír a continuación. La universalidad de la *Teoría* de Einstein es indicio de que en las aplicaciones cosmológicas, pueden esperarse aún consecuencias interesantísimas. Y ¿qué diremos de su validez eterna? El hombre que en ella creyera, no habría entendido aún la esencia de la convicción del mismo Einstein, que ha luchado toda su vida por la sinceridad y la sobriedad en la ciencia. Preguntémosnos, inversamente, si pudieran existir razones para desear una modificación de la teoría de Einstein o para su substitución por otra más general aún. Señalemos el hecho innegable de que ella no deja margen para la explicación de lo discontinuo, atómico de la materia, energía y otras magnitudes físicas, que sin embargo todos los días alcanza mayor importancia en la ciencia moderna. Recordemos, ahora, que Riemann insinuó un espacio discontinuo en 1854, que Weyl insistió, el año 1918, en que no debería perderse de vista tal posibilidad, y que finalmente Born, en 1948 enuncia el posible reemplazo de la teoría de la relatividad de Einstein por otra en que el elemento infinitesimal  $ds$  se substituye por una magnitud finita, mínima, de acuerdo con el principio de incertidumbre de Heisenberg. ¿Qué diría Einstein de que su teoría pasaría, así, de moda? Desde luego, ella guardaría su valor dentro del dominio de validez que le es asignado, tal como ocurrió con la mecánica de Newton al advenimiento de la relatividad. Y con respecto a ésta ha dicho el mismo Einstein, que una teoría no puede encontrar mejor última suerte que de ser absorbida por una teoría más amplia y general. En vista de la sinceridad y de la modestia que le eran propias a Einstein no me cabe duda alguna de que gustoso habría aplicado este mismo lema a su propia teoría, que nunca habría pretendido haber llegado al último peldaño de la infinita escala del saber que nos afanamos en trepar.