Ricardo Solar

La relatividad y el problema físico del espacio, del campo y del éter según el profesor Dr. Einstein.

Adaptación al español para el Instituto de Ingenieros, de la conferencia desarrollada por el Prof. Dr. Alberto Einstein, durante las sesiones de la «Segunda Conferencia Mundial de la Energía» en Berlín, por el delegado chileno Ing. Ricardo Solar.

LAS ideas y los sistemas de ideas, si los consideramos lógicamente, no provienen jamás de sensaciones; pero son siempre provocados por las sensaciones y aun cuando lo son de manera muy indirecta, se refieren a sensaciones y es en esta relación en la que reside su espíritu y su importancia.

Si queremos comprender el sentido de la idea precientífica del espacio, debemos tratar de representarnos los rasgos del mundo de nuestras impresiones que han dado lugar a la formación de la idea de espacio, y a la de la noción de geometría en general.

Considerada desde este punto de vista, la idea de espacio precede al concepto del mundo exterior real y de los cuerpos. No tenemos para qué buscar más en detalle cuáles son los caracteres del mundo de nuestras impresiones que han llevado a estas ideas fundamentales, ni en qué reside el encadenamiento de estas ideas con el mundo de nuestras impresiones.

Entre las impresiones que se agrupan alrededor de la idea de «cuerpo» existe una categoría que juega un rol especial, intelectualmente formulada como «posición relativa de los cuerpos».

De ella parten las ideas de espacio, así como los sistemas de ideas de la geometría de Euclides.

El elemento de concepción más importante para establecer las leyes de posición de los cuerpos inmóviles, es el de su contacto, y es sobre este elemento en que reposan las ideas principales de congruencia y de medida.

La gran importancia de la geometría de los griegos reside en el hecho que ella representa—de acuerdo con nuestros conocimientos—el primer ensayo tentado para comprender y formular intelectualmente un complejo de sensaciones, sirviéndose de un sistema de razonamiento deductivo. En vez de partir del cuerpo con sus formas variadas, se toma como punto de partida algunos elementos que conciernen a la forma, el punto, la recta, el plano, la rectilínea; y se ha construído puramente mentalmente según reglas determinadas como fundamentos, es decir según axiomas, las formas de los cuerpos y las relaciones de posiciones entre ellos.

Los elementos iniciales precitados son ellos mismos idealizaciones de cuerpos materiales.

La idea de continuidad del espacio no se presenta en la geometría de los Griegos, aunque representa ciertamente una parte constituyente del razonamiento precientífico. Ella ha sido, por el contrario, introducida en las matemáticas solamente por Descartes, el padre de la geometría moderna. Los griegos se habían contentado con estudiar las relaciones recíprocas de posición de sus cuerpos idealizados, el punto, la línea recta, el plano, la reetilínea.

La idea de espacio tiene por base la idea más simple de estudiar la relación de posición de todos los cuerpos con respecto a otro solo, que la relación de posición de todos los cuerpos entre ellos. Pero este cuerpo solo es la ficción de un cuerpo indefinidamente extendido, es decir de un cuerpo con el cual todos los otros pueden ser puestos en contacto.

Es claro que la existencia de una superficie del globo casi rígida o la existencia de la hoja de dibujo en el estudio de las figuras planas con ayuda de la representación por medio del dibujo, debe haber cooperado a la formación de esta idea.

El mérito de Descartes al introducir en matemáticas el principio de «continum» del espacio, no puede ser lo bastante estimado. Esta introducción ha permitido primero la descripción de figuras geométricas sirviéndose del análisis matemático. Además, Descartes hizo entrar en forma más decisiva la geometría en las ciencias propiamente dichas, pues a partir de aquella fecha las rectas y los planos no fueron más tomados en principio de preferencia a las otras líneas y superficies, tratándose de igual manera todas las líneas y superficies.

En lugar del sistema de axiomas complicados de la Geometría de Euclides, se sirvió de un solo axioma que, en nuestro lenguaje actual se enuncia como sigue: hay sistemas de coordenadas en relación con las cuales la distancia ds de puntos vecinos P y G se expresa por las diferencias de las coordenadas dx_1, dx_2, dx_3, en la fórmula $ds^2 = dx_1^2 \times dx_2^2 \times dx_3^2$.

Se puede deducir de esto, es decir de la métrica de Euclides, todas las ideas y las proposiciones de la geometría de Euclides.

Pero lo que es todavía más importante, es que sin la introducción del principio de «continum» del espacio en el sentido de Descartes, la mecánica de Newton no habría podido ser formulada.

La idea fundamental de aceleración que se emplea en esta teoría, debe ser basada en la idea de espacio de coordenadas de Descartes, puesto que la aceleración no puede ser deducida de ideas referentes solamente a la posición relativa de los cuerpos y de los puntos materiales, o a sus cambios pasajeros en el tiempo. Se puede decir con razón, de acuerdo con la teoría de Newton: el espacio juega el rol de una realidad física, lo que Newton supo perfectamente, pero lo que no han visto los que han llegado después de él.

El espacio de coordenadas de Descartes tenía, pues, primeramente considerado desde el punto de vista físico, dos funciones independientes. Determinaba, por el teorema de Pitágoras del cuadrado de la hipotenuza, las posiciones posibles de los cuerpos prácticamente rígidos y del movimiento de inercia de los puntos materiales. Parecía ser absoluto en el sentido que podía ejercer influencia o actuar, pero que nada podía actuar modificándolo: era el inmenso espacio sin límites y eternamente invariable de todo lo que existía y llegara.

El armazón de la física de Newton está caracterizada por las ideas de espacio y de tiempo como materia ponderable. A esto ha venido a agregarse en el siglo diecinueve un nuevo elemento, el éter.

Cuando Young y Fresnel hubieron establecido el carácter ondulatorio de la luz, uno se ha sentido forzado a admitir una materia inerte, penetrando en todos los cuerpos, llenando completamente todos los espacios, a saber: el éter, en las oscilaciones del cual debía existir la luz.

El armazón teórico de Newton ha sido totalmente destrozado por la teoría de los campos de origen electromagnético de Faraday y Maxwell; pues poco a poco se desarrolló la opinión que los campos electromagnéticos localizados también en espacios sin materia, no podían comprenderse sin contestación o al menos de manera satisfactoria, como estados mecánicos del éter.

Se ha acostumbrado a considerar los cuerpos electromagnéticos como estados fundamentales de naturaleza no mecánica. En todo caso, ellos han continuado siendo considerados como estados del éter que, en sí, no podían ser comprendidos como una formación análoga a la materia ponderable, tanto que al final del siglo pasado la convicción de la estructura molecular de esta última había ganado terreno.

Si los campos se han impuesto como estados fundamentales de naturaleza no mecánica, esto no ha solucionado la cuestión de las propiedades mecánicas del éter en que se producen los campos. H. A. Lorentz ha contestado esta pregunta demostrando que todos los hechos electromagnéticos nos fuerzan a admitir que el éter se encuentra en cualquier parte en estado de reposo con referencia al espacio de Descartes o de Newton.

Como habría sido fácil decirlo: los campos son estados del espacio, el espacio y el éter no forman una misma cosa; pero no se ha dicho porque se consideraba el espacio como absoluto, como base de la métrica de Euclides y de la inercia de Galileo y de Newton; es decir, se le consideraba como un armazón rígido del mundo, no influenciable, que existe, por decir así, antes de toda física y no puede ser sustentador de estados variales.

El paso siguiente en el desarrollo de las ideas de espacio es el de la *teoría especial de la relatividad*,

La ley de la propagación de la luz en los espacios vacíos, combinada con el principio de la relatividad con respecto al movimiento uniforme, ha tenido como consecuencia la necesidad de fusionar el espacio y el tiempo en un continum cuadrudimensional uniforme, pues se ha reconocido que no existe ninguna realidad correspondiente a la concepción de acontecimientos simultáneos.

A este espacio cuadrudimensional, como lo ha reconocido primeramente Minkowski, debería atribuírsele una métrica de Euclides, que es perpetuamente análoga a la métrica tridimensional de la geometría de Euclides con el empleo de una coordenada imaginaria de tiempo.

Es sobre la existencia de una estructura del espacio que se puede expresar por la métrica de Euclides, que se basan desde entonces los desarrollos cuyas etapas son conocidas con el nombre de «*Teoría General de la Relatividad*» y «*Teoría uniforme de los Campos*».

Después de haber reconocido que no se podía atribuir un carácter absoluto ni a la velocidad, ni tampoco a la aceleración, se hizo manifiesto que no existe en la naturaleza ninguna realidad correspondiente a la idea del sistema de inercia. Se comprendió que las leyes debían ser formuladas de tal manera que estas fórmulas pudiesen en presencia de todo sistema de coordenadas de Gauss, ser válidas para los espacios cuadrudimensionales (convariancia general de las ecuaciones que expresan las leyes naturales).

Es el contenido formal del principio general de la relatividad. Su importancia eurística reside en la pregunta: ¿Cuáles son los sistemas más simples de ecuaciones convariantes en general?

En estos términos generales, esta pregunta no es todavía fecunda, es preciso agregar una indicación en cuanto al carácter de la estructura del espacio; y esta es dada por la teoría especial de la relatividad que debe mantenerse válida para partes infinitamente pequeñas del espacio.

Existe pues una estructura del espacio que puede expresarse matemáticamente por una métrica de Euclides para las vecindades infinitesimales de cada punto; o en otras palabras, el espacio tiene una métrica de Riemann. Por razones físicas, es claro que esta métrica de Riemann representaba también al mismo tiempo la expresión matemática del campo de gravitación.

La cuestión matemática correspondiente en el problema de la gravitación era, pues: ¿Cuáles son las condiciones matemáticas más simples a las cuales puede estar sometida una métrica de Riemann en espacios cuadrudimensionales? Y es así como se han encontrado las ecuaciones del campo de gravitación en la teoría general de la relatividad, que ya han tenido sus confirmaciones bien conocidas.

La importancia de esta teoría para la comprensión de la naturaleza del espacio puede ser caracterizada como sigue: el espacio pierde su carácter absoluto por la teoría general de la relatividad.

Hasta esta fase del desarrollo el espacio era admitido como algo cuya composición interna no estaba sujeta a ninguna influencia y era aun del todo invariable, por lo cual se debía admitir un éter especial como portador de los estados de campos localizados en los espacios sin materia. Pero desde el momento de la introducción de esta teoría se reconoció que la propiedad propiamente dicha del espacio,—la estructura métrica—era variable y sujeta a influencias.

El estado del espacio adquirió el carácter de campo y el espacio en lo que concierne a su estructura llegó a ser análogo a los campos electromagnéticos. La separación entre las ideas «espacio» y «éter» cayó, puede decirse, por sí misma después que la teoría especial de la relatividad hubo quitado ya al éter el último resto de su materialidad.

La teoría general de la relatividad en su forma actual, habría sido desde el punto de vista lógico, gracias a su unidad, una teoría física ideal si sólo hubiese en la naturaleza campos de gravitación y no campos electromagnéticos, ya que estos últimos no pueden ser representados por la métrica de Riemann.

Era necesario pues esforzarse por encontrar una estructura de mayor riqueza de formas, que comprendiese la estructura métrica de Riemann y capaz al mismo tiempo de describir matemáticamente el campo electromagnético. Esta tarea le corresponde a la *«teoría uniforme de los campos»*, especialmente basándose en una estructura del espacio cuyas características son las siguientes:

Sean P y P′ dos puntos cualesquiera del continuum; $\overline{PG}$ y $\overline{P'G'}$ dos líneas que parten de estos puntos.

La condición preliminar de la estructura métrica indica que tiene un sentido, hablar de la igualdad de las dos líneas, o sea, en general, que las líneas pueden ser comparadas por sus magnitudes.

El carácter de la métrica de Riemann se expresa por la condición fundamental que el cuadrado de la magnitud de la línea puede expresarse por una función homogénea de segundo grado de las diferencias de las coordenadas. Al contrario, en la Geometría de Riemann, una enunciación con respecto a una relación de direcciones, por ejemplo un paralelismo de dos líneas $\overline{PG}$ y $\overline{PG'}$ no tiene ningún sentido.

Si se agrega ahora la condición que tenga un sentido hablar de la relación de paralelismo entre las dos líneas, se llega al principio formal de la teoría uniforme de los campos.

Como complemento basta agregar la condición que el ángulo entre dos líneas que parten de un mismo punto no varía por desplazamiento paralelc de ellas.

Las condiciones matemáticas más simples a que puede ser sometida una tal estructura del espacio, debe ser la expresión matemática de las leyes del campo. Estas leyes parece que se han llegado a encontrar, correspondiendo en realidad aproximadamente con las leyes empíricas conocidas de la gravitación y de la electricidad.

Investigaciones matemáticas profundas deben probar si estas leyes de los campos pueden proporcionar también una teoría utilizable de las partículas materiales y de sus movimientos.

En resumen, podemos decir simbólicamente: el espacio traído a la luz por los cuerpos, y elevado a una realidad científica por Newton, ha hecho desaparecer en las últimas decenas de años el éter y el tiempo, y está en vías de hacer desaparecer también el campo y los corpúsculos, de manera que quedará como único representante teórico de la realidad.