

## El problema del Espacio, el Campo y el Eter en la Física

Por el Prof. ALBERTO EINSTEIN

(Trad. del alemán especialmente para DYNA por Roberto Cadavid)

Los conceptos y los sistemas de conceptos nunca provienen lógicamente hablando, de la experiencia de los sentidos. Pero siempre se originan, aunque de manera indirecta, en esta experiencia y se relacionan con ella, y en esta relación finca precisamente su importancia y su esencia.

Si nos queremos dar cuenta de la esencia del concepto de espacio, tenemos que estudiar aquellos principios de nuestro mundo de experiencias que han dado sentido, no sólo al concepto de espacio sino a todos los conceptos geométricos. Desde este punto de vista los conceptos antecesores al concepto de espacio son sin duda alguna los de ambiente real y objeto material, y no nos incumbe a nosotros analizar qué caracteres del mundo de experiencia han conducido a estos conceptos fundamentales y en qué consiste la relación íntima entre estos conceptos y el mundo de experiencias.

Entre las experiencias que se agrupan bajo la noción "objeto corporal" desempeña un papel especial una categoría que se define como "posición mutua de los objetos materiales". A esta categoría se ligan, tanto los conceptos de espacio como los de la Geometría euclídea. El elemento de concepto más importante para comprender las leyes de posición de los objetos materiales es el tacto. En él se fundan los conceptos más importantes de la congruencia y de la medición.

La suma importancia de la Geometría de los griegos radica en el hecho de que ella representa—a lo menos así parece—el primer ensayo de percepción en conceptos de un complejo de experiencias sensitivas por medio de un sistema lógico deductivo. En lugar de partir de los cuerpos en sus diversas formas, se fundan ellos en pocos elementos formales (punto, recta, plano, trayectoria), sobre los cuales se construyen las formas de los cuerpos y sus relaciones de mutua posición apoyándose—de una manera pura—



mente ideal—en reglas inconcusas: los axiomas; los llamados elementos de partida son idealizaciones de objetos corporales.

El concepto de continuo espacial no aparece en la Geometría de los griegos a pesar de constituir seguramente una parte esencial de pensamiento clásico. Sólo vino a ser introducido en la Matemática por Descartes, el fundador de la Geometría moderna. Los griegos se contentaron con estudiar las relaciones de posición mutua de sus objetos materiales idealizado: punto, recta, plano y trayectoria.

La idea madre es que aparece más sencillo estudiar la relación de posición de todos los cuerpos con respecto a **uno solo**, que uno con respecto a otros. **Este** cuerpo es sólo la ficción de un cuerpo ilimitado, por ejemplo un cuerpo con el cual se puedan poner en contacto todos los demás. Es claro que la existencia de una superficie terrestre casi rígida, por ejemplo la existencia de la hoja de dibujo en el estudio de las figuras planas, debe haber inducido, por medio de la representación gráfica, a la formación de este concepto.

No puede ser apreciado debidamente el mérito de Descartes al introducir el continuo espacial en la matemática. Este adelanto facilitó primero la descripción de las figuras geométricas por medio del análisis. En segundo lugar profundizó decididamente la Geometría como ciencia. Porque desde entonces no se prefirieron la recta y el plano entre otras líneas y superficies, sino que en adelante todas las líneas y superficies tuvieron una importancia igual. En lugar del complicado sistema axiomático de la Geometría euclídea se planteó un axioma único que en nuestro modo de decir se expresa así: Existen sistemas de coordenadas con respecto a los cuales la distancia  $ds$  entre dos puntos consecutivos  $P$  y  $Q$ , y apoyándose en los diferenciales de coordenadas  $dx_1$ ,  $dx_2$ ,  $dx_3$ , se formula así:

$$ds^2 = dx_1^2 + dx_2^2 + dx_3^2$$

De aquí, por lo tanto, según la métrica euclídea se deducen todos los conceptos y proposiciones de la Geometría de Euclides.

Pero lo más importante es tal vez que sin la introducción del continuo espacial de Descartes sería absolutamente imposible formular la Mecánica de Newton, porque, por ejemplo, el concepto fundamental de aceleración usado en esta teoría debe apoyarse en el concepto de espacio de coordenadas de Descartes, pues de ninguna manera se puede deducir la aceleración a partir de nociones



que se refieran exclusivamente a la posición relativa de los cuerpos o puntos materiales o de su variación temporal. Se puede decir fundadamente que según la teoría newtoniana el espacio desempeña el papel de un real físico, cosa que sabía muy bien Newton, pero que olvidaron los que le sucedieron.

Desde el punto de vista físico el espacio de coordenadas cartesianas tenía, pues, dos funciones independientes: determinar (por medio del teorema de Pitágoras) tanto las posiciones posibles de los cuerpos prácticamente rígidos como el movimiento de inercia de los puntos materiales. Parecía que cuando este espacio obraba era absoluto, que sobre él no podía obrar nada modificándolo, de modo que era como el ilimitado recipiente, eternamente inalterado de todos los seres y todos los acontecimientos.

Los límites de las leyes de Newton se caracterizan por los conceptos espacio, tiempo y materia ponderable. A estos se sumó en el siglo XIX un nuevo elemento: el éter. Cuando Young y Fresnel comprobaron la certeza del carácter ondulatorio de la luz, se tuvo por necesaria la existencia de una materia inerte, llamada éter, cuyas vibraciones constituyen la luz, y que atravesando todos los cuerpos llenara por completo el espacio.

La teoría de Newton fué desbancada por completo por la teoría de campo de los fenómenos electromagnéticos (Faraday y Maxwell). Porque paulatinamente llegóse a la conclusión de que los campos electromagnéticos localizados en el espacio vacío no pueden considerarse de manera satisfactoria como estados mecánicos del éter. Se acostumbró considerar los campos electromagnéticos como elementos de índole no mecánica. Sin embargo se los continuó considerando como estados del éter, pero no ya análogos a la materia ponderable, cuanto más que a fines del siglo pasado se afirmó más y más la convicción de la certeza del carácter molecular de la materia.

Aunque era cierto que los campos no eran ya elementos concebibles dentro de la Mecánica, subsistía la pregunta acerca de las propiedades mecánicas del éter. A ésta respondió H. A. Lorentz así: Todos los hechos electromagnéticos nos obligan a suponer que el éter está en todas partes en reposo con respecto al espacio de Descartes o de Newton. Estuvo a punto de decirse: Los campos son estados del espacio; espacio y éter son idénticos. Pero no se dijo esto a causa de que se consideró como absoluto, es decir no influenciado, el espacio como lugar de la Métrica euclídea y de la



Inercia de Newton y Galileo. Consideraron, pues, el espacio como esqueleto rígido del mundo, que está antes que todo y que no puede ser receptor de estados variables.

El próximo paso en el desarrollo del concepto de espacio lo da la teoría especial de la Relatividad. La ley de la propagación de la luz en el vacío en asociación con el principio de relatividad para el movimiento uniforme, trajo como consecuencia necesaria que el espacio y el tiempo deberían confundirse en un continuo único de cuatro dimensiones. Porque se vio que la noción de simultaneidad no correspondía a nada real.

Como lo comprendió claramente Minkowski por primera vez, este espacio tetradimensional debía tener una métrica euclídea, que es exactamente análoga a la métrica de tres dimensiones de la geometría euclídea, usando una coordenada imaginaria de tiempo. Sobre la existencia de una estructura de espacio enunciable por medio de una métrica euclídea se basa el desarrollo actual, cuyos adelantos se conocen con las denominaciones: "Teoría General de la Relatividad" y "Teoría Unitaria de Campo".

Cuando se vio que ni a la velocidad, ni siquiera a la aceleración se les podía atribuir carácter de absolutas, fue evidente que al concepto del sistema de inercia no correspondía nada real en la naturaleza. Debían, pues, enunciarse las leyes de suerte que sus fórmulas fueran válidas para todo sistema de coordenadas de Gauss en el espacio tetradimensional (covariación general de las ecuaciones que expresan las leyes naturales). Este es el tenor formal del principio general de relatividad. Su fuerza eurística radica en la manera de formular la pregunta: cuáles son los sistemas más sencillos de ecuaciones covariantes en general?

En esta forma general no es bien fructífera la pregunta. Hay que agregarle aún un dato sobre el carácter de la estructura del espacio. Ese dato lo suministra la teoría especial de la relatividad, en cuya validez para fracciones infinitamente pequeñas del espacio no hay que dudar. Esto significa que hay una estructura del espacio que puede ser expresada matemáticamente y por una métrica euclídea para el ambiente infinitesimal de cada punto. O que el espacio tiene una métrica de Riemann. Por razones de Física es evidente que esta métrica de Riemann sirve también para la expresión matemática del campo de gravitación.

La pregunta matemática que correspondía al problema de gravitación era entonces la siguiente: cuáles son las condiciones mate-



máticas más sencillas a que puede someterse una métrica de Riemann en el espacio tetradimensional? Así se hallaron las ecuaciones de campo de gravitación de la teoría general de la relatividad, que como es bien sabido, han sido confirmadas.

La importancia de esta teoría para el conocimiento de la esencia del espacio puede expresarse así: el espacio pierde con la teoría general de la relatividad su carácter de absoluto. Anteriormente se consideraba él como algo cuya calidad intrínseca no era influenciable por nada, o sea absolutamente invariable; por eso precisamente hubo que suponer la existencia del éter, como receptor de los estados de campo localizados en el espacio vacío. Pero después se vio que la cualidad más propia del espacio, su estructura métrica, era variable e influenciable. El estado del espacio obtuvo carácter de campo; el espacio era análogo al campo electromagnético en cuanto a su estructura. Puede decirse que la separación de las nociones espacio y éter desapareció así automáticamente, después de que ya la teoría especial de la relatividad había despojado al éter del resto de su carácter material.

Debido a su homogeneidad la teoría general de la relatividad sería, desde el punto de vista lógico, el ideal de una teoría física, si en la naturaleza no existieran sino campos gravitatorios. Pero existen también campos electromagnéticos. Estos últimos no pueden representarse por la métrica de Riemann. Hay que procurar, pues, hallar una estructura de más formas, que incluya la de Riemann y que sirva para describir matemáticamente el campo electromagnético. Este problema lo ha de resolver la teoría uniforme de campo basándose en una estructura del espacio cuya expresión matemática es la siguiente:

Sean  $P$  y  $P'$  dos puntos cualesquiera del continuo.  $PG$  y  $P'G'$  dos elementos lineales que partan de estos puntos. La hipótesis de la estructura métrica dice que puede hablarse de la igualdad de estos dos elementos de línea, o, en general, que estos elementos son comparables en cuanto a su tamaño. El carácter riemannico de la métrica se expresa por la hipótesis de que el cuadrado de la magnitud del elemento lineal puede darse por una función homogénea del segundo grado de los diferenciales de coordenadas. En cambio en la Geometría de Riemann vendría fuera de propósito un enunciado acerca de la relación de las direcciones; por ejemplo un enunciado sobre el paralelismo de dos elementos de línea  $PG$  y  $P'G'$ . Agregando ahora la hipótesis de que se pueda hablar fundadamente de la



relación de paralelismo de los elementos lineales, se llega a la base formal de la teoría uniforme de campo. Para ser completos agreguemos la hipótesis de que el ángulo entre dos elementos lineales que parten del mismo punto no varía por traslación paralela.

La expresión matemática de las leyes de campo han de ser las condiciones matemáticas más sencillas a que puede someterse tal estructura especial. Parece que se han logrado hallar estas leyes, que coinciden aproximadamente con las leyes empíricamente conocidas de gravitación y electricidad. Investigaciones matemáticas más profundas tienen que estudiar ahora si estas leyes de campo pueden suministrar una teoría aceptable de las partículas materiales y de sus movimientos.

En resumen, podemos decir que el espacio, puesto en evidencia por el objeto material y llevado a la realidad científica por Newton, ha absorbido en los últimos decenios al éter y al tiempo y que está a punto de absorber también el campo y sus corpúsculos, de suerte que sólo él queda como único representante teórico de la realidad.

(Presentado por el autor a la segunda conferencia de energía en 1930)..