

## La materia <sup>(1)</sup>

SUMARIO: Significado del tema. — Interés filosófico del desarrollo de los conceptos de las ciencias físicas. — La materia y el espacio. — El volumen como posible propiedad específica de la materia; la impenetrabilidad. — El concepto de materia en los físicos griegos: Herón de Alejandría, Demócrito, Leucipo. — La materia en la dinámica de Newton; materia e inercia; masa inercial. — La masa electromagnética; inercia del electrón. — La inercia de la energía en la teoría especial de la relatividad. — El peso como posible propiedad característica de la materia. — Peso e inercia en la teoría general de la relatividad. — La materia en la teoría de constitución del átomo. — Conclusiones.

¿Qué es la materia? He aquí una pregunta que parece clara y precisa. Sin embargo, nada hay tan dudoso como su significado; nada tan variado como los innumerables matices con que puede

(1) Conferencia pronunciada por el profesor Isnardi, en el salón de grados de la Facultad, el 24 de octubre de 1927. El conferenciante fué presentado al público por el entonces decano, profesor Alberini, en los siguientes términos:

El doctor Teófico Isnardi es uno de nuestros jóvenes sabios de más honda vocación científica y un espíritu de amplio horizonte mental. Siente con ardor y personalidad su ciencia predilecta, la física superior, pero, al mismo tiempo, bien se percata de cuán importante es la reflexión filosófica sobre los conceptos cardinales de la ciencia. La inquietud gnoseológica, expresada en conocidos trabajos, tal como *Realismo e idealismo en la ciencia*, recientemente publicado en *La Nación*, justifican la presencia del doctor Isnardi en esta cátedra de historia epistemológica de la ciencia, cátedra que pronto figurará en el plan de estudios. Se trata de una enseñanza libre instaurada en esta casa desde hace varios años. Es notorio que la Facultad gestionó las conferen-

revestírsela; nada tan diferente como las interpretaciones que adquiere en distintos espíritus.

El filósofo la entenderá en su significado ontológico; quiere saber si la materia es substancia o accidente, si es «cosa en sí» o apariencia. Para él la materia es, si no toda, por lo menos una parte de la realidad; y entonces la pregunta le conduce a la siguiente: ¿qué es la realidad? y por lo tanto, previamente: ¿la realidad es?

El físico es más modesto en su interpretación. Puesto en el caso de «absolver posiciones», y séame permitida esta expresión jurídica, se limitará a un juicio definitorio, es decir, fundamentalmente analítico; intentará, por lo tanto, un análisis elemental del concepto y, más precisamente, se ocupará de poner en claro todos — y sólo aquellos — juicios analíticos comprendidos en el concepto de materia que sean indispensables para la elaboración de su ciencia. En el espíritu del físico, la pregunta adquiere un significado restringido que puede sintetizarse así: ¿Cuáles son los atributos específicos de la materia, es decir, aquellos que permiten reconocerla en el conjunto de nuestras percepciones y que la física presupone como fundamento de sus estudios?

Voy a concretarme a este último aspecto del problema; y ello

cias dictadas en ella por Einstein, Langevin, Blas Cabrera y Rey Pastor, quienes disertaron sobre temas propuestos por el que habla. Tiende este nuevo esfuerzo de la Facultad a refinar el sentido intelectual en la Argentina, estableciendo, además, una vinculación entre los distintos órdenes de estudios, propios de los otros institutos universitarios. Fomentase, así, el amor a la ciencia pura, que nos libra de la hegemonía absoluta de la técnica utilitaria, y se adquiere el estudio de la unidad de la cultura, buen antídoto contra el especialismo extremo y contra cualquier forma de dogmatismo científico. Bueno es, y mucho, que los filósofos tengan cultura científica, pero no lo es menos que los hombres de ciencia positiva logren sospechar la índole de los problemas susceptibles de nacer en la raíz del conocimiento científico.

El doctor Teófilo Isnardi percibe estos problemas. No ignora que la epistemología ha llevado al laboratorio el espíritu criticista, o sea, el pensar sobre el pensar científico. Por eso nos hablará sobre *La materia*. Dispongámonos, pues, a disfrutar de su sabia palabra, tan llena de entusiasmo como de claridad sobria e incisiva.

impone una justificación, porque dirigiéndome a un auditorio de filósofos, desde una cátedra de filosofía, parecería impropio excluir de antemano el aspecto filosófico del problema. Pero tengo para ello buenas razones.

Hace apenas algunas semanas abordé en otro lugar el problema de las relaciones de la ciencia con la realidad, y creo haber demostrado que el supuesto de una realidad permanente no es indispensable para la conquista de los fines prácticos de la ciencia, que son sin duda los más importantes, y que la afirmación de una tal realidad sale fuera del dominio científico, porque es de carácter metafísico; correspondiendo por tanto a la metafísica decidir si, y en cuánto, puede aprovechar de los resultados científicos. Por ello no creo poder aportar, en mi condición de estudiante de física, ninguna contribución útil para la solución de aquel problema.

No por eso la evolución de la física y el contenido de sus conceptos fundamentales deben ser indiferentes para los filósofos. Einstein y Langevin han ocupado recientemente esta misma cátedra, solicitados por el señor decano, como una prueba del interés filosófico que tienen los problemas fundamentales de la ciencia. Y ese interés proviene en parte, a mi juicio, de lo siguiente: la ciencia realiza una obra previa de depuración de los conceptos fundamentales con que trabaja la inteligencia humana, y la filosofía debe considerar como punto de partida de la mayoría de sus especulaciones aquellos conceptos ya depurados de los vicios con que el hábito o la sensación inmediata los corrompen. Resulta así que el número y la extensión de los juicios analíticos que la ciencia utiliza de cada uno de sus conceptos es mucho menor y más restringido que lo que presupone el entendimiento vulgar. Y ello es particularmente notable en la geometría, donde la obra de los logistas ha permitido reducir a un mínimo los juicios analíticos sobre los conceptos de punto, recta y plano, que son necesarios para construir lógicamente toda la geometría; de tal modo que los mismos juicios, y por lo tanto los mismos teoremas geométricos, resultan, en su totalidad, apli-

cables a representaciones fundamentalmente diferentes de las representaciones intuitivas del punto de la recta y del plano. Un estudio de la geometría, desde este punto de vista, sería, a mi entender, de un altísimo interés filosófico, además de su interés puramente matemático.

Pero no es este el único motivo del interés filosófico de los problemas científicos. La evolución de los conceptos métricos del espacio y del tiempo, en la física, plantea problemas que la filosofía no debe desconocer. Por ejemplo: desde el punto de vista puramente físico, la síntesis de los conceptos de espacio y de tiempo en el espacio tetradimensional de la teoría general de la relatividad sólo puede estar supeditada a una prueba o condición de carácter experimental, a saber: si mediante esa síntesis es posible o no una descripción de los fenómenos más exacta y más económica que mediante la separación prerrelativista de aquellos conceptos. Pero desde el punto de vista filosófico importa decidir si aquella síntesis es efectivamente una síntesis conceptual, es decir, si el intelecto humano puede pensar sintetizando efectivamente los conceptos de espacio y de tiempo; o si, por el contrario, es solamente un artificio formal adecuado para la descripción matemática de los fenómenos.

No corresponde al tema que hoy me propongo desarrollar, el estudio de esta cuestión. Solamente quiero hacer notar que cualquiera fuese la respuesta, ella tendría un altísimo interés filosófico.

Si la física ha realizado la síntesis conceptual del espacio y el tiempo, no podrá desconocer la filosofía la importancia de ese resultado. Algunos físicos eminentes — Langevin entre ellos — llegan hasta presumir la necesidad de modificar nuestro intelecto: para ellos las formas de nuestra intuición, incluso las formas a priori que suponía Kant, han sido el resultado de las experiencias relativamente groseras de nuestros antepasados. Nuevas experiencias más precisas nos obligarían a construir conceptos y adoptar formas diferentes; la síntesis espacio-tiempo sería una de ellas. Si esta síntesis se lograra, si el hombre pudiera intuir

el espacio tetradimensional relativista, se habría logrado la solución de uno de los problemas más antiguos de la psicología: el del origen de nuestras formas intuitivas y de nuestros conceptos, que serían entonces puramente empíricos. El criticismo kantiano estaría atacado en su primera página; porque el fundamento de toda la *Critica* está en la afirmación de que, si bien cronológicamente todo conocimiento comienza con la experiencia, es decir, con la sensación, no por eso se deriva totalmente de ella. Y así distingue Kant en el fenómeno intuitivo, la «materia», que proviene de la sensación, y la «forma», que permite la ordenación de las intuiciones en el espacio y el tiempo.

Si, por el contrario, aquella síntesis relativista fuera solamente un artificio formal para la descripción matemática de los fenómenos, no puede ser indiferente para la filosofía el hecho de que la interpretación de los resultados experimentales obligue a la ciencia a formar seudos conceptos que la mente humana es incapaz de intuir. El criticismo kantiano acaso podría mantenerse incólume; pero, aceptándolo, habría que reconocer que la totalidad de nuestras experiencias no se adapta a las formas a priori de nuestra intuición, aunque estas formas necesariamente sean previas a toda experiencia particular.

Después de esta larga digresión, por la que pido disculpa, volvamos a nuestro tema.

En muchos libros elementales de física pueden leerse las siguientes definiciones: cuerpo es todo lo que ocupa un lugar en el espacio; el cuerpo es una porción limitada de materia.

El concepto de materia se reduce así al de espacio; o, más precisamente, al de medida del espacio o del volumen.

A pesar de su aparente sencillez, la definición que precede incluye dificultades insolubles. Desde luego, si bien se examina, la medida del espacio se hace por medio de la materia de nuestras reglas y aparatos de medición. El concepto de espacio no incluye en sí mismo el principio de su medida.

Esta profunda observación corresponde a Riemann, en su célebre memoria sobre los fundamentos de la geometría. Riemann

denomina multiplicidad al conjunto de determinaciones particulares de un concepto general y distingue las multiplicidades continuas de las discretas, según sea o no posible pasar de una a otra determinación en forma continua. Los puntos de una recta o del espacio, los colores del espectro, forman multiplicidades continuas; la población de un país, el capital de una sociedad comercial, son multiplicidades discretas, que tienen por elementos el habitante y la unidad monetaria, respectivamente.

Ahora bien: el principio de medida de un *quantum* de la multiplicidad, en el caso de una multiplicidad discreta, está incluido en el concepto de la misma; la medición se reduce entonces a la operación de contar el número de elementos incluidos en el *quantum* que se mide, tal como se hace para la población de un país o de una ciudad. Pero no sucede lo mismo en las multiplicidades continuas; aquí, para utilizar la expresión de Riemann, « el principio de las relaciones métricas debe venir de afuera ».

Es interesante comprobar que esta profunda distinción, de gran alcance en el campo de las matemáticas, estaba ya contenida en la metafísica de Aristóteles, lo que, según creo, no ha sido señalado por sus comentaristas. En efecto, en el libro I, dice Aristóteles: « Obsérvese que el ancho-angosto y el alto-bajo son de diverso género. Del mismo modo, en aquellos grandores no está comprendido el concepto de número, porque el mucho-poco pertenece a un género diverso de ella », etc. El « mucho-poco » de Aristóteles, que comprende el concepto de número, equivale a las multiplicidades discretas de Riemann; el ancho-angosto y el alto-bajo, que no lo comprenden, son ejemplos de multiplicidades continuas. Además, al afirmar Aristóteles que estas dos últimas son entre sí de diverso género, coincide en otro punto con Riemann, donde dice que « las determinaciones métricas exigen la independencia entre las magnitudes y los lugares ». Sin esta independencia no es posible reducir la métrica de una multiplicidad de  $n$  dimensiones a la de otra de  $(n - 1)$  dimensiones; es decir, no es posible reducir al mismo género, el ancho-angosto y el alto-bajo.

Ahora bien: si el espacio es una multiplicidad continua, el principio de su métrica no está incluido en su propio concepto. ¿Cómo lo hemos introducido en él? Mediante nuestras reglas rígidas, es decir, mediante las propiedades de la materia y los juegos que las determinan. Decimos que un *quantum* de una recta, es decir, un segmento, es igual a otro, cuando una misma regla rígida puede coincidir sucesivamente en toda su longitud con uno y otro segmento. No podemos entonces definir la materia por su propiedad de ocupar un lugar en el espacio, porque así describiríamos evidentemente un círculo vicioso. Es la métrica del espacio que se define mediante la materia, y no ésta mediante aquélla.

Pero supongamos definida la métrica del espacio sin necesidad de la materia, acaso mediante la luz, por ejemplo, con que realizamos en la práctica las rectas físicas. ¿Tendría entonces un significado preciso para la definición de cuerpo como todo lo que ocupa un lugar en el espacio? Y ese significado ¿coincidiría con la noción intuitiva y científica de cuerpo y materia?

La primera pregunta puede responderse afirmativamente. Ocupar un lugar en el espacio significaría entonces lo siguiente: es posible separar un *quantum* limitado de la multiplicidad y distinguirlo del resto por alguna propiedad física; es decir, es posible comprobar que ciertas regiones limitadas del espacio presentan propiedades particulares: resistencia a la penetración, desviación o absorción de los rayos luminosos, etc.

Pero en general, las porciones así definidas no coincidirán con la noción intuitiva y científica de cuerpo material. A menudo los físicos observan propiedades particulares en regiones limitadas del espacio, y sin embargo no las atribuyen a la presencia de materia. En un campo eléctrico o en un campo magnético se producen fenómenos particulares que los aparatos de física acusan sin dificultad; uno y otro campo pueden ser perfectamente limitados, es decir, que aquellos fenómenos se presentan en una región bien definida del espacio; y, sin embargo, ningún físico las atribuye a la presencia de materia en tales campos, que pueden producirse

también, en el vacío. Es decir: los campos eléctricos y magnéticos ocupan un lugar en el espacio, que puede ser limitado, y, a pesar de ello, no son para la ciencia ni cuerpo ni materia. La definición sería, por lo tanto, inadecuada, porque comprende más de lo que la intuición y la ciencia incluyen en el concepto de materia.

Parecería que pudiera resolverse la dificultad imponiendo como propiedad característica de las regiones ocupadas por materia, la de impenetrabilidad, que no presentan los campos antes mencionados. Pero esta propiedad sólo conviene a la materia absolutamente rígida e indivisible, que no se presenta a nuestra observación. Si quisiéramos verificarla en el caso de un gas, debiéramos concluir que el aire no es materia, a menos que, trasponiendo mediante una hipótesis audaz los límites de la experiencia, imaginemos que aquella propiedad corresponde a los átomos constitutivos. Así lo afirmó Demócrito, el filósofo atomista de Abdera; pero la ciencia no puede aceptar como definición de la materia una propiedad que traspone los límites de la experiencia, y es, por lo tanto, incontrolable. ¿Cómo podríamos afirmar en tal caso que el campo eléctrico o magnético no es materia, si lo es el aire, cuya penetrabilidad experimental no difiere de la de aquéllos?

Es por ello muy instructiva para nuestro objeto la discusión sostenida entre físicos y filósofos griegos acerca de si el aire es o no es materia. La cuestión se vinculaba entonces con la de posibilidad de existencia del vacío, porque si el aire no es materia, la atmósfera sería un espacio vacío. Y los experimentos invocados para decidir que el aire es materia permiten inducir cuál era el significado que daban a este concepto.

El tema fué tratado especialmente por Herón de Alejandría. Poco sabemos de la vida de este eminente físico y matemático griego, anterior en un siglo a la era cristiana; pero sus obras han llegado hasta nosotros y merecen, entre todas las de su época, una atención especial de los físicos, porque acaso él fué el único experimentador de la antigüedad. Como geómetra se le debe la fórmula para calcular el área del triángulo dadas las longitudes



de sus lados. Como físico sus descubrimientos e inventos lo colocan al lado de Arquímedes, y acaso en un plano aun superior. A Herón se debe fundamentalmente la teoría que en la Edad media se sintetizó en el principio del « horror del vacío », teoría de que hay ya indicios en las obras de Aristóteles. Abandonada esta teoría después del descubrimiento de la presión atmosférica por Torricelli y Guericke, no por eso debe considerársela como cosa desleznable, que en tal caso no se habría conservado durante diez y siete siglos, hasta contar entre sus partidarios al mismo Galileo. Pero la importancia en el desarrollo de la física se advierte mejor si se considera que mediante esa teoría pudo Herón explicar el funcionamiento del sifón, idear el vaso de Tántalo, la válvula de líquidos y gases, que es uno de los órganos fundamentales de las bombas y máquinas neumáticas, construir la primera bomba impulsante y la primera bomba para comprimir aire, etc.

Al comienzo de su libro dice Herón : « Antes de entrar en la materia que debemos suponer, tenemos que tratar del « vacío ». Algunos afirman que el vacío no existe ; otros, que el vacío no puede alcanzar un espacio total, sino que está comprendido en partes muy pequeñas entre las partículas de agua, aire, fuego y otros cuerpos, opinión a la cual le asignamos la ventaja de que parece exacta no sólo a la observación sino también al razonamiento. Pues recipientes que a muchos parecen vacíos, no lo están, sino llenos con aire. Según la opinión de quienes han estudiado la naturaleza, el aire consiste de pequeños corpúsculos livianos ; y cuando echamos agua en un recipiente, que parece vacío, sale de él tanto aire como agua entra, lo cual se puede demostrar en la siguiente forma : Cuando se sumerge invertido en agua un recipiente aparentemente vacío, el agua no penetra en él, ni aun sumergiéndolo totalmente... Retirando el recipiente se observa que su superficie interior está seca y limpia, porque el agua no ha penetrado en él. Por tanto debe considerarse el aire como un cuerpo », etc.

Analícemos un poco esta demostración. En resumen, se reduce a lo siguiente : el aire opone una cierta resistencia a la disminu-

ción de volumen. Herón sabía que el volumen de aire no es invariable; conocía perfectamente su compresibilidad; y la denominada fuente de Herón, que aun figura en los libros elementales de física, es una aplicación de dicha compresibilidad. No es, por lo tanto, la constancia del volumen, sino la resistencia opuesta a su variación, el fundamento de su conclusión de que el aire es un cuerpo. En resumen, continúa dominando el concepto de materia la noción de impenetrabilidad, pero desarrollada de tal modo que es susceptible de comprobación experimental.

Ningún físico actual consideraría bien fundada la conclusión de Herón de Alejandría. Podemos imaginar, en efecto, la siguiente experiencia análoga.

Tengamos un cilindro cerrado por un émbolo móvil. Las superficies interiores del cilindro y del émbolo son espejos perfectos, es decir, que reflejan totalmente la radiación luminosa o calorífica que sobre ellos incide. El espacio interior no contenga aire, ni ningún otro cuerpo, pero sí radiación luminosa o calorífica; supongamos, además, un dispositivo que equilibre a la presión atmosférica, que actúa en la superficie exterior del émbolo. Pero la radiación contenida en el interior del cilindro ejerce sobre sus paredes y sobre el émbolo una cierta presión, que depende de la cantidad de energía contenida por unidad de volumen, y aumenta proporcionalmente con ésta. Por tanto, si desplazamos el émbolo, la presión interior aumenta cuando disminuye el volumen, y recíprocamente, como sucede en el caso de un gas. Sin embargo, no concluimos, a partir de esta experiencia, que la luz o, en general, la radiación calorífica, sean cuerpos materiales.

Es verdad que la experiencia que acabamos de describir es puramente ideal, es decir, no podría realizarse prácticamente, porque la presión de la radiación de que se trata es tan pequeña que no existe la posibilidad de ponerla de manifiesto mediante un dispositivo tan rudimentario. Pero esa presión ha sido medida por otros métodos; y la consideración de la experiencia ideal que antecede sirve como punto de partida de varios razonamientos en el estudio de la radiación y conduce a resultados que la experiencia

comprueba; todo lo cual le da valor experimental. Desde el punto de vista teórico no puede ser una objeción digna de tomarse en cuenta la circunstancia de que la realización de una determinada experiencia tropiece con dificultades de orden técnico.

Por tanto, si no tuviéramos otro fundamento que la experiencia de Herón para afirmar que el aire es un cuerpo, deberíamos hacer igual afirmación con respecto de la luz y de toda radiación.

Vemos así el fracaso de las tentativas realizadas por los antiguos para reducir el concepto de materia a definiciones de carácter espacial. Acaso Leucipo, que fué discípulo de Demócrito, advirtió la necesidad de asignar a la materia una propiedad específica, no reductible a las nociones fundamentales de espacio y tiempo, porque dió a los átomos una nueva propiedad fundamental: el peso.

Analicemos, por lo tanto, si puede ser esta la propiedad específica de la materia, que nos permita definirla y por lo tanto reconocerla. Desde luego, la noción de peso es relativamente compleja: el peso es una fuerza; es la fuerza de atracción que la Tierra ejerce sobre los cuerpos situados en sus proximidades; y la noción de fuerza es acaso la que mayores dificultades encierra en el dominio de la mecánica. Es evidente, por otra parte, que el concepto de materia no puede depender de la proximidad con la Tierra; nosotros asignamos instintivamente materialidad a los astros, aun cuando en realidad no « pesan », porque debido a su enorme distancia la acción terrestre sobre ellos es despreciable. La ley de conservación de la materia indica que la ciencia reconoce en la materia un índice particular que no puede ser su peso, porque aun sobre la superficie de la Tierra el peso de un mismo cuerpo varía de un lugar a otro, en virtud de la variación de la aceleración de la gravedad.

Para discutir más ampliamente la cuestión tenemos que referir algunas nociones fundamentales de la dinámica. La crítica de la obra de Newton, debida fundamentalmente a Mach, condujo a un resultado importante desde nuestro punto de vista, a saber: la re-

ducción de los conceptos de masa y de fuerza a los de espacio y tiempo; y la masa es en la mecánica clásica el carácter específico de la materia.

Reuniendo las nociones de espacio y tiempo se obtiene la noción de movimiento; pero para ello es necesario agregar dos elementos fundamentales: el móvil y el sistema de referencia. No podemos, desde luego, obtener ninguna imagen de los cuerpos ni de sus movimientos mientras el espacio sea homogéneo; es necesario, por tanto, que existan puntos del espacio que puedan diferenciarse de los demás, es decir, que puedan ser objeto de nuestras percepciones; los llamaremos *puntos substanciales*, siguiendo la nomenclatura de Minpowski, sin especificar con ello si se trata de materia o de electricidad, etc. Suponemos, además, la posibilidad de reconocer en el transcurso del tiempo un mismo punto substancial. El conjunto de puntos substanciales dotados de una cierta permanencia constituye un objeto sensible, sin que con esto signifique que sea material. Con ello tenemos ya el móvil, aunque no todavía la materia; porque nuestro móvil podría ser, por ejemplo, una sombra que se desplazara sobre una superficie iluminada.

En cuanto al sistema de referencia, nada obstaría para que nos colocáramos en el punto de vista de Newton, que admitía el espacio absoluto; pero podemos también elegir un sistema de referencia independiente de esta hipótesis, definido por ejemplo mediante tres estrellas de las denominadas fijas, que son objetos sensibles en el sentido antes mencionado.

Con estos elementos, la cinemática define fácilmente la trayectoria, la velocidad y la aceleración del movimiento de un punto substancial, en cada instante. La velocidad es una magnitud vectorial, es decir, caracterizada no sólo por su medida sino, además, por su dirección y su sentido. Análogamente, la aceleración, que expresa la variación de velocidad por unidad de tiempo, es también una magnitud vectorial.

Ahora bien: los objetos materiales forman un grupo particular en el conjunto de objetos sensibles, caracterizados por lo siguiente:

1° Si dos puntos materiales A y B están alejados de todos los demás, cada uno de ellos se mueve con una aceleración dirigida según la recta que los une y de sentido opuesto a la del otro ;

2° La relación de los valores de las aceleraciones respectivas depende exclusivamente de los puntos considerados ; es decir, indicándolos con  $\Lambda_A$  y  $\Lambda_B$  :

$$(1) \quad \frac{\Lambda_A}{\Lambda_B} = \text{const} = M_B.$$

Esta relación se denomina la masa del punto B cuando se toma el punto A como unidad ;

3° Las aceleraciones recíprocas que adquieren dos puntos materiales B y C, suficientemente alejados de los demás, son inversamente proporcionales a sus masas respectivas, con respecto a una unidad arbitrariamente elegida :

$$(2) \quad \frac{\Lambda_B}{\Lambda_C} = \frac{M_C}{M_B}, \text{ o sea } M_B \Lambda_B = M_C \Lambda_C \quad (2')$$

Este producto se denomina la *fuerza* que actúa entre ambos puntos materiales ; ambas fuerzas son iguales y opuestas (principio de acción y reacción). Fuerza es, por lo tanto, el producto de la masa por la aceleración :

$$(3) \quad F = m \cdot a$$

La fuerza que actúa sobre cada uno de los puntos depende desde luego del otro ; de su distancia mutua ; de las condiciones experimentales (electrización, propiedades magnéticas), etc. Pero la masa es una constante propia de cada punto material.

Es fácil dar una interpretación intuitiva de esta constante. En efecto, de acuerdo con el segundo enunciado, de dos puntos materiales que actúan recíprocamente uno sobre otro adquirirá menor aceleración aquel que tenga mayor masa ; o si utilizamos la noción de fuerza, podemos decir : cuanto mayor sea la masa, menor será la aceleración, es decir, la variación de velocidad producida por una cierta fuerza  $F$  que actúa sobre el punto o cuerpo

considerado. La constante  $m$  indica, por lo tanto, la tendencia del punto o cuerpo a mantener su estado de movimiento (inercia), es decir, su velocidad. Por eso se la denomina *masa inerte* (de inercia), o también *constante de inercia*. Esta misma constante es la que figura en la conocida fórmula de la energía cinética, también denominada (aunque impropia) fuerza viva :

$$(4) \quad E_c = \frac{1}{2} m v^2.$$

Si a los tres enunciados anteriores agregamos un cuarto que expresara la independencia de acción de las fuerzas, habríamos resumido todos los fundamentos de la dinámica clásica; pero este cuarto enunciado no es necesario para nuestro objeto. Hagamos sí notar explícitamente que tales fundamentos son resultados experimentales, y no por cierto juicios analíticos sobre los conceptos de especie, tiempo y materia.

Ahora bien : en la mecánica clásica el índice característico de la materia es la masa, que traduce, según hemos visto, su propiedad de inercia. En ella podríamos decir : un objeto sensible es un objeto material si tiene masa inerte, es decir, si presenta la propiedad de la inercia. Y la importancia de la exposición que precede, cuyas líneas generales se deben a Mach, consiste en haber fundado el concepto de inercia y el principio de su medida, exclusivamente en los de espacio, tiempo y movimiento; pero independientemente del concepto de fuerza, que aparece como una simple definición auxiliar.

Finalmente, la identificación de los conceptos de materia y de inercia, mediante la masa, permite considerar a ésta como la medida de la *cantidad de materia* de un cuerpo; y el principio de *conservación de la materia* expresa que la *masa* de un sistema cerrado se conserva invariable, cualesquiera sean las transformaciones que experimente.

Tal era el estado de la cuestión hasta hace cuarenta años. Los físicos de entonces hubieran podido enorgullecerse de poseer un

concepto claro y una definición precisa de la materia; pero desde entonces las cosas han variado fundamentalmente. Veamos por qué.

La obra de Newton sobre la gravitación universal está expuesta en su casi totalidad en el lenguaje de la teoría de las fuerzas a distancia que admita la posibilidad de que un punto o un cuerpo actúe a distancia sobre otro, sin hacer intervenir ningún vínculo de unión entre ellos. El mismo Newton reconoció las dificultades que esta teoría representaría para todo espíritu ejercitado en las reflexiones filosóficas; y es posible que en su mente la descripción de los fenómenos desde ese punto de vista tuviera un significado puramente eurístico, en virtud de su evidente sencillez.

En otros campos de la física, a saber en el estudio de las propiedades eléctricas y magnéticas, los primeros investigadores y teóricos siguieron el ejemplo de Newton; pero aquí se presentaron mayores dificultades a partir de los descubrimientos de Faraday sobre la influencia del medio en las acciones eléctricas y magnéticas. Sabido es, desde entonces, que las fuerzas actuantes entre dos cuerpos electrizados depende de la materia interpuesta.

Para explicar este hecho se presentaron dos posibilidades. Una radical, iniciada por el mismo Faraday y desarrollada matemáticamente por Maxwell, que consiste en abandonar la teoría de las acciones a distancia y admitir que las acciones electromagnéticas se transmiten por el medio interpuesto y que las acciones entre los cuerpos electrizados son la resultante de las acciones inmediatas del medio o campo electromagnético; otra, que mantuvo la teoría de las acciones a distancia, e interpretó la influencia del medio atribuyéndolas a nuevas cargas eléctricas y magnéticas inducidas en la materia interpuesta.

Mientras se tratara de fenómenos estáticos, una u otra interpretación conducía a los mismos resultados; pero no así cuando se tratara de fenómenos rápidamente variables. En efecto, la acción debiera ser instantánea en la teoría de acciones a distancia, mientras que, por el contrario, se propagaría con cierta velocidad al través del medio según la teoría de Faraday-Maxwell. El des-

cubrimiento de las ondas de Hertz significó el triunfo definitivo de esta última teoría, que las había predicho: por el contrario, según la teoría de las acciones a distancia no puede haber ondas electromagnéticas, ni por lo tanto radiotelegrafía ni radiotelefonía. Esto basta para dar una idea del valor experimental de la teoría de Faraday-Maxwell en que se fundan las siguientes consecuencias.

Ahora bien: según esta teoría, una esfera metálica electrizada tiene una inercia al movimiento *mayor* que si estuviera descargada, y esta inercia no es constante sino que depende de su velocidad. Para el caso de velocidades pequeñas con relación a la velocidad de la luz el aumento de su inercia debido a la carga eléctrica  $e$  será igual a:

$$\frac{2}{3} \frac{e^2}{r}$$

en que  $r$  es el radio de la esfera. O dicho en otros términos: si la masa de la esfera sin carga eléctrica es  $m$ , su masa con carga es:

$$m' = m + \frac{2}{3} \frac{e^2}{r}$$

Pero la carga eléctrica que puede acumularse en una esfera metálica es tan pequeña (expresada en unidades electromagnéticas) que el aumento de masa resulta inaccesible a la determinación experimental. No así, si se tratara de esferas cuyo radio fuera sumamente pequeño, y de inercia mecánica despreciable. Tal es el caso de los corpúsculos catódicos y de los corpúsculos B emitidos por las substancias radioactivas. Son estas partículas negativamente electrizadas, animadas de enormes velocidades, que se aproximan a la velocidad de la luz. La desviación de estos proyectiles en un campo eléctrico y en un campo magnético permite determinar su velocidad y su masa. Y los resultados experimentales conducen a lo siguiente: la masa correspondiente a pequeñas velocidades es unas 1800 veces menor que la del átomo más liviano conocido, que es de hidrógeno; pero esta masa aumenta con la velocidad;



y crece indefinidamente cuando ésta se aproxima a la velocidad de la luz, como lo preveía la teoría. Tales partículas negativas se denominan *electrones*.

Ahora bien. ¿No será posible suponer que toda la masa del electrón se debe a la inercia de su carga eléctrica y que por lo tanto el electrón es electricidad pura, y desprovisto de materia? Esta hipótesis fué formulada por J. J. Thomson; y no sólo debe reconocerse su posibilidad, sino que es la hipótesis más aceptable desde el punto de vista de la teoría atómica de la materia; porque de lo contrario habría que admitir una subdivisión de ésta que repugna al espíritu de aquella teoría. Sea como fuere, es decir, admítase o no que toda la masa del electrón es de origen electromagnético, se tiene el resultado indudable de que por lo menos una parte de su inercia o sea de su masa no es debida a la materia, y de que esta masa no es constante.

La identificación de la materia con la inercia y su medición mediante la masa no es ya posible; la inercia no es, como se creía hace cuarenta años, de propiedad específica de la materia.

De la teoría especial de la relatividad dedujo Einstein, en 1905, un principio general del cual el resultado anterior constituye un caso particular. En efecto, según aquella teoría, toda forma de energía, incluso la luz, posee inercia. Si  $E$  es la energía que contiene un cuerpo, el valor correspondiente de la inercia, es decir, de la masa, es igual a  $E$  dividido por el cuadrado de la velocidad de la luz. Este valor coincide con el deducido de la teoría electromagnética en el caso de un electrón esférico, si con  $E$  se representa la energía del campo electromagnético del electrón en movimiento.

Así aparece la inercia, no como un carácter específico de la materia, sino como una propiedad también de la energía. ¿Será posible considerar toda la masa de un cuerpo como de origen energético?

Los resultados expuestos hasta aquí no permiten tal generalización; y la dificultad proviene de la ley de gravitación de Newton,

como lo veremos en seguida. Esa dificultad consiste, en resumen, en lo siguiente: aun cuando la energía tiene inercia y, por lo tanto masa, no por eso tiene peso; el peso podría ser entonces la propiedad específica de la materia. Veamos a qué consecuencias nos conduciría esta hipótesis.

Desde luego, dos cuerpos de igual peso podrían no tener iguales masas, si sus contenidos de energía no fueran iguales; o recíprocamente, dos cuerpos de iguales masas, pero de diferente contenido de energía, tendrían diferente peso. Ahora bien, como la aceleración de caída libre en el vacío es igual al cociente del peso dividido por la masa total, cualquiera sea el origen de ésta, resultaría que en ambos casos antes mencionados los dos cuerpos caerían con diferentes aceleraciones y, por lo tanto, con diferentes velocidades en el vacío. Esto está en contra de un resultado experimental bien conocido. Para que tal no suceda, sería necesario admitir que todos los cuerpos de igual peso tienen también igual contenido de energía y, por lo tanto, igual masa; pero esto es muy poco probable dada la diversidad de las sustancias químicas y las diferencias de energías que se observan en sus transformaciones.

Es verdad que estas diferencias producirían variaciones de la masa inapreciables en una experiencia tan rudimentaria como la caída de los cuerpos; pero si se piensa que las sustancias obtenidas en las transformaciones químicas siempre conservan semejanzas con las que las produjeron, mientras que las propiedades de diversos elementos difieren enormemente entre sí, no parecerá aventurado afirmar que los diversos elementos deben diferir entre sí mucho más que los compuestos de iguales elementos en cuanto a sus contenidos de energía (presunción que se comprueba experimentalmente en las transformaciones radioactivas), y que, por lo tanto, acaso fueran apreciables experimentalmente las diferencias de masa a igualdad de peso. Sin embargo, experiencias muy precisas realizadas por Octvös y Zeemann permiten establecer, como uno de los más exactos resultados experimentales, *la igualdad de pesos a igualdad de masas*. Admitido este resultado, es necesario

concluir que si la energía tiene masa, es decir inercia, también tiene peso; la luz y el campo magnético pesan.

Una hipótesis tan audaz no hubiera sido admitida, y acaso ni siquiera enunciada, si ella no condujera a resultados de un enorme alcance teórico. Puede decirse, en efecto, que toda la teoría general de la relatividad arranca de una interpretación de esta hipótesis, a saber: si la masa y el peso están invariablemente unidos y son entre sí proporcionales, debe admitirse que la inercia, cuya traducción numérica es la masa, y la gravitación, cuya traducción en el caso particular, es el peso, son una misma propiedad. Tal es el postuladò fundamental de la teoría general de la relatividad; mejor dicho, para satisfacer al principio general de la relatividad es necesario admitir esa consecuencia, que puede, a la inversa, deducirse de ese principio general, si se admite la validez de la teoría restringida en todo dominio infinitamente pequeño.

Por tanto, en la teoría general de la relatividad no cabe distinción conceptual entre la materia y la inercia. Einstein comprende en la denominación de la materia, no sólo la materia en el sentido común, que él llama restringido, sino también el campo electromagnético, es decir, la inercia. Y agrega: « Sobre la naturaleza física de la materia, en sentido restringido, no es necesario introducir suposiciones determinadas. En particular, puede mantenerse abierta la cuestión de saber si la teoría del campo electromagnético y la teoría de la gravitación serán no una base suficiente para la teoría de la materia. »

Saliendo de la teoría de la relatividad podríamos penetrar en la moderna teoría del átomo, estrechamente vinculado con aquélla; y nos encontraríamos con un hecho no menos sorprendente: no figura en ella la materia, como substracto de ninguna propiedad específica; el átomo se construye totalmente con electricidad positiva en los *protones* que figuran en el núcleo, negativa en los *electrones* que son los satélites que lo rodean.

En resumen podemos decir: en la física actual no existe ninguna propiedad específica que pudiéramos atribuir a un substracto al que denominaríamos materia. Lo que habitualmente denomina-

mos tal, no puede definirse en forma precisa, ni poseemos, al respecto, una teoría que la diferencie de otros elementos, tales como el campo electromagnético, en nuestra imagen del mundo físico. Acaso en esta imagen los únicos abstractos sean la electricidad positiva y la negativa; pero ya algunas teorías ensayaron reducirlos a un fenómeno más general que los comprendería.

TEÓFILO ISNARDI.