

## Las partículas fundamentales El atomismo contemporáneo

Por Luis Estrada

Saber cual es la estructura de la materia, esto es de qué están hechas las cosas que componen el mundo, ha sido una de las principales inquietudes de la humanidad. Los griegos, en el siglo V antes de nuestra era, dieron las explicaciones más antiguas de que tenemos noticia. Lucrecio y Leucipo enseñaron que la materia está formada por pequeños cuerpos indivisibles a los que llamaron átomos, palabra que significa “lo que no puede cortarse más”. Para ellos las características de las cosas se derivan de las propiedades de esos átomos y así por ejemplo la miel y la leche tienen sabor agradable porque sus átomos son lisos y esféricos. No puede negarse que estas ideas son notables aunque ingenuas.

En la misma Grecia y en semejante época hubo otras explicaciones. Empédocles creía que las cosas eran combinaciones de cuatro componentes básicas que llamó elementos. Estos eran el aire, el agua, la tierra y el fuego. Así la madera es pesada y sólida porque contiene tierra, y cuando se calienta se humedece porque tiene agua. Si la madera se quema produce humo por tener aire y emite llamas a causa del fuego que contiene. El candor de estas explicaciones es evidente y lo que ahora sabemos es mucho más complejo que lo que pudieron haber soñado los griegos. Sin embargo el propósito de la búsqueda sigue siendo el mismo y el saber contemporáneo es un refinamiento de esas ideas primitivas: la materia tiene estructura atómica y sus componentes se designan ahora partículas fundamentales.

Debo advertir que los términos que ahora empleamos pueden provocar confusiones por lo que hay que tener cuidado en verificar el significado de algunas palabras. Ejemplos importantes de éstas son átomo, partícula y elemento como veremos más adelante. Debo señalar también que el éxito del atomismo contemporáneo se debe a la elaboración de una nueva parte de la física: la mecánica cuántica. De ésta sólo diré aquí que es la explicación del comportamiento de los cuerpos microscópicos y que se distingue de la teoría clásica, la mecánica newtoniana, en dos aspectos esenciales: 1. no presupone un modelo único para la descripción de los cuerpos que considera (la imagen de la partícula puntual es una de las posibilidades) y 2. su descripción es probabilista (la posición de una partícula, por ejemplo, sólo se determina en términos de la probabilidad de localizarla).

Para entender cómo está formada la materia es necesario considerar varios niveles que forman una jerarquía. El primero establece que todos los materiales conocidos son compuestos de elementos químicos. Estas sustancias son las agrupadas en la Tabla periódica de los elementos, descubierta por Dimitri Mendeleev. Ahora se conocen 118 elementos químicos de los cuales sólo 92 son naturales ya que el resto ha sido fabricado en los laboratorios. No sobra reiterar que

la noción actual de elemento es muy diferente a la empleada por Empédocles aunque ella conserva algo de ese sentido pues seguimos considerando que la materia es una combinación de elementos químicos. Así el agua es un compuesto formado por dos elementos: el Hidrógeno y el Oxígeno, y se acostumbra representarlo con el símbolo  $H_2O$ .

El siguiente paso es reconocer que los elementos químicos tienen estructura atómica y que sus componentes, en las condiciones terrestres ordinarias, son las moléculas. Empero las moléculas también son compuestos pues están formados por átomos. El oxígeno, por ejemplo, en condiciones normales es un gas diatómico pues sus moléculas están compuestas por dos átomos de oxígeno. Para resumir repetiré que los elementos químicos están formados por moléculas y éstas por átomos. Por lo tanto las componentes básicas de los elementos químicos son los átomos y la Tabla periódica de los elementos es la colección de los diferentes tipos de átomos que hay en la naturaleza.

Es claro que llamar átomos a las componentes de los elementos químicos es sólo un accidente histórico pues ahora sabemos que estos objetos también son compuestos. Sin entrar todavía en detalles diré que los átomos son conjuntos de electrones sujetos por un núcleo que actúa como centro de fuerzas. Para precisar lo dicho es necesario mencionar que la electricidad –ese fluido que circula en nuestras casas para que se prendan los focos y funcionen el televisor, el refrigerador y otros aparatos de uso doméstico– también tiene estructura atómica y su “átomo” es el electrón. Este objeto es una de las partículas fundamentales y puede pensarse como una “bolita”, una “masa puntual”, aunque su representación propia es materia de la mecánica cuántica. Lo importante es señalar que el electrón posee carga eléctrica negativa por lo que está sujeto al núcleo atómico que está positivamente cargado.

Como acabo de decir un átomo es un conjunto de electrones sujetos a la atracción de un núcleo que posee carga eléctrica positiva. La disposición de estas componentes, aunada al hecho de que el núcleo es muchísimo más pesado que el electrón, ha hecho que el átomo se considere como un pequeñísimo “sistema planetario solar” en el que los electrones juegan el papel de las planetas y el núcleo el del Sol. Es claro que esta imagen no es la que resulta de la mecánica cuántica aunque será apropiada para los propósitos de este artículo. Lo importante ahora es notar que los átomos son estructuras eléctricamente neutras por lo que el número de electrones que forma un átomo es igual a la carga del núcleo si ésta se mide en unidades de la carga del electrón –conviene recordar aquí que la carga del electrón ha sido tomada como la unidad natural para medir la carga eléctrica.

Con lo dicho podemos ahora dar la explicación actual de la Tabla periódica de los elementos. El átomo más sencillo es aquel que tiene un sólo electrón y éste es el Hidrógeno. El siguiente está compuesto por dos electrones y es el Helio. El átomo del Litio tiene tres electrones, el del Berilio cuatro y así sucesivamente. Las columnas de la tabla –dos primero, ocho dominantes y más después– están determinadas por las leyes de la física cuántica. Los electrones sólo pueden

ocupar ciertos sitios y cada uno de éstos únicamente puede ser ocupado por un electrón por lo que se acostumbra hablar de capas electrónicas y decir que “van llenándose”. Esta situación es la que, en la imagen popular, correspondería a la formación de “órbitas planetarias”. Los átomos con capas llenas son muy estables y constituyen los llamados gases nobles.

Como ya dije los núcleos atómicos tienen carga eléctrica positiva, proporcional al número de electrones del átomo, y son mucho más pesados que los electrones. El núcleo del Hidrógeno posee la misma carga del electrón y su masa es 1836 veces la del electrón. En el caso del Helio la carga nuclear es el doble de la del electrón pero su masa es casi cuatro veces la del núcleo del Hidrógeno. Que esta relación de masas sea mayor que 2 no tiene porqué llamar la atención aunque sí el descubrimiento de que hay átomos que tienen núcleos con masa distinta. En el caso del Hidrógeno existen varios núcleos posibles: el ordinario, que como ya mencioné es 1836 veces más pesado que el electrón, y otros dos más masivos. Los átomos correspondientes se conocen con los nombres de Deuterio y Tritio siendo el primero el que da lugar a la existencia del agua pesada, una sustancia cuya molécula se representa por  $D_2O$ , siendo D el símbolo del Deuterio.

Los átomos cuyo núcleo tienen la misma carga pero distinta masa se llaman isótopos. Así los átomos del Hidrógeno, del Deuterio y del Tritio son isótopos. En el caso del Helio hay cuatro y sus átomos se simbolizan por  $He^3$ ,  $He^4$ ,  $He^5$  y  $He^6$ , siendo el segundo el del Helio ordinario. Lo notable de las sustancias formadas por isótopos es que la mayoría son inestables, dando lugar al fenómeno conocido como radiactividad. En el caso del Helio los isótopos  $He^5$  y  $He^6$  son radiactivos, por lo que las sustancias formadas con ellos se transforman en otras pasado un corto tiempo. La radiactividad es uno de los fenómenos nucleares más conocidos y su descubrimiento condujo al conocimiento de la estructura del núcleo atómico.

Sabemos ahora que los núcleos atómicos están compuestos por protones y neutrones. Para abreviar el lenguaje se acostumbra llamar nucleón a cualquiera de esas partículas, aunque reconocemos ya que forman parte de un familia mucho mayor cuyos miembros se denominan bariones y que examinaré más adelante. Las masas de los nucleones son muy semejantes —el protón es 1836 veces más pesado que el electrón, como ya he dicho, mientras que el neutrón lo es 1838 veces— y su diferencia esencial está en que el neutrón es eléctricamente neutro. Para regresar a mi explicación diré que el núcleo del átomo del Hidrógeno es un protón mientras que el del Deuterio está formado por un protón y un neutrón, lo cual lo hace doblemente pesado y no altera su carga eléctrica. El Tritio está formado por dos neutrones y un protón y el Helio ordinario ( $He^4$ ) por dos neutrones y dos protones. Lo dicho sugiere la posibilidad de ordenar a los núcleos atómicos de manera semejante a lo hecho por Mendeleev con los elementos. Reconociendo que aún no he explicado cómo se unen los nucleones y recordando que este asunto es materia de la física cuántica diré que tal sugerencia ha tenido éxito por lo que existe la Tabla nuclear.

Como ya mencioné los electrones están sujetos a los núcleos gracias a la fuerza de atracción eléctrica. En el caso nuclear la situación es muy diferente ya que las componentes nucleares jue-

gan papeles idénticos y se ligan directamente entre sí –en el núcleo atómico no hay algo que pueda considerarse como un “sol”. La fuerza que une a los nucleones se denomina interacción fuerte y es muy distinta de la eléctrica. Se caracteriza por ser “de corto alcance” –actúa sólo a distancias pequeñísimas– y es muy intensa –muchísimo más “fuerte” que la eléctrica. Es importante señalar aquí que en el dominio que estoy describiendo actúa otra fuerza nuclear: la llamada interacción débil, la cual es la principal responsable de la radiactividad pues transforma unas partículas nucleares en otras. El ejemplo más importante de estas transformaciones es la llamada “desintegración beta”, la cual consiste en que un neutrón puede convertirse en un protón además de crear un electrón y otra partícula: un neutrino.

Antes de continuar desarrollando mi tema debo mencionar otra peculiaridad de la Física cuántica. De acuerdo con esta teoría las fuerzas también tienen estructura atómica. Así la fuerza eléctrica, esto es la producida por la carga eléctrica, es un compuesto y sus “átomos” son los fotones. No sobra recordar aquí que la luz es un fenómeno originado por las cargas eléctricas –es un onda electromagnética– que ahora sabemos está compuesta por fotones. Por consiguiente las fuerzas nucleares –las interacciones fuerte y débil– deben también ser explicadas en términos atómicos y por el momento sólo diré que los “átomos” de la interacción débil son las partículas W y Z. A diferencia de los fotones estas partículas tienen masa –muy grande– y las primeras poseen carga eléctrica por lo que se distinguen la  $W^+$  y la  $W^-$ .

Hacia fines de la primera mitad de este siglo el estudio de las partículas nucleares se complicó, a la vez que se enriqueció, con los hallazgos en la radiación cósmica. Este fenómeno consiste en que la Tierra recibe continuamente partículas procedentes de su exterior, muchas de las cuales eran desconocidas en los laboratorios. Entre las primeras descubiertas se encuentran las llamadas mesones “mu” y “pi”. (Cuando la presencia de partículas atómicas empezó a proliferar los físicos las nombraron empleando letras griegas. El mesón mu ahora se conoce como muón y el pi es el pión). Como ya señalé los nucleones pertenecen a la familia de los bariones y otros de sus miembros son las partículas “lambda”, “sigma” y “xi”. Una familia más de partículas es la de los mesones, a la cual pertenecen los piones y las partículas K.

La comprensión de tal variedad de partículas encontradas empezó a lograrse cuando se descubrió que el protón es un compuesto. Este logro nos hizo saber de la existencia de una familia de partículas conocidas como los cuarc. Aunque al principio se pensó que sólo había tres cuarc ahora conocemos seis, los cuales se han identificado por las letras u, d, s, c, b y t. (Estas letras provienen de que sus descubridores los llamaron “quarks up, down, strange, charm, bottom and top” respectivamente). Por lo tanto ahora sabemos que el protón está formado por dos cuarc u y un d y que el neutrón está integrado por dos cuarc d y un u. Los cuarc poseen carga eléctrica, aunque sólo una fracción de la carga del electrón que hasta antes del descubrimiento de esas partículas se había considerado como la expresión mínima de la electricidad.

La descripción precisa de un compuesto de cuarc es, ¡naturalmente!, un asunto de la física

cuántica. Sin embargo podemos seguir empleando imágenes ordinarias y añadir que estas partículas forman compuestos gracias a que hay una fuerza capaz de mantenerlas unidas. Esta se conoce como la interacción de color, aunque nada tiene que ver con el color que conocemos en la vida cotidiana. La razón (¿razón?) de usar esa palabra en el caso de los cuarc es que para describir la acción de las fuerzas que los unen es necesario tener tres tipos de carga y éstas fueron bautizadas con los nombres rojo, verde y azul porque la mezcla de luces de esos colores produce luz blanca. Consecuentemente la fuerza que une a los cuarc recibió el nombre de interacción de color. Es conveniente recordar aquí que hay dos tipos de carga eléctrica: la positiva y la negativa y que los átomos, en su estado normal, son eléctricamente neutros. En el caso de los cuarc sucede algo semejante por lo que el estado normal de un compuesto de cuarc es “blanco”, esto es, corresponde a situaciones en que la interacción de color está “equilibrada”, o sea, es neutra.

Los cuarc son los “átomos” de los nucleones y de las otras partículas nucleares que antes mencioné: las familias de bariones y mesones. Sin entrar en detalles diré que estas partículas también pueden organizarse en una forma que recuerda las tablas periódica y nuclear. Igualmente mencionaré que la fuerza que ejercen entre sí los cuarc, la interacción de color, tiene estructura atómica siendo sus elementos los llamados gluones. Estas partículas, como el fotón, tienen masa nula y forman una familia de ocho miembros. Lo más importante de los cuarc y de su modo de interactuar es que sugieren que no son compuestos, es decir, son partículas fundamentales.

Cuando hablé de las fuerzas nucleares señalé que hay dos clases: las interacciones fuertes y las débiles. Mencioné que estas últimas están compuestas por las partículas W y Z y no dije lo correspondiente a los “átomos” de la fuerza nuclear. Debo ahora aclarar que la fuerza nuclear no es una interacción fundamental pues se deriva de la de color. Para explicar esto conviene recordar que las fuerzas que unen a los átomos para formar moléculas son muy variadas; entre ellas están las ligaduras iónica y covalente, las fuerzas de Van der Waals y los puentes de Hidrógeno. La descripción de estas fuerzas es irrelevante para los propósitos de este artículo aunque no lo es el hecho de que todas ellas pueden explicarse como consecuencias de una fuerza fundamental: la interacción electromagnética. En el caso nuclear hemos descubierto que sucede algo similar: la fuerza que los nucleones ejercen entre sí es una consecuencia de la interacción de color que actúa en los cuarc que forman a los protones y neutrones.

Por otra parte, como los electrones, muones, tauones y los neutrinos –partículas que han sido agrupadas bajo el nombre de leptones– han mostrado no ser compuestos, esto es, son partículas fundamentales, las investigaciones en la física de las partículas han llegado a un punto que parece indicar el final del desarrollo del atomismo contemporáneo. Los resultados actualmente aceptados pueden resumirse de la siguiente manera:

### **El atomismo actual**

La materia ordinaria está formada de moléculas.  
 Las moléculas están formadas por átomos.  
 Los átomos son sistemas de electrones unidos por un núcleo.  
 Los núcleos están formados por nucleones.  
 Los nucleones están formados por los cuarc.  
 Los elementos constitutivos del Universo –las partículas fundamentales–  
 son los cuarc y los leptones.

La descripción que he hecho de la naturaleza de la materia corresponde a la teoría científica conocida en los medios especializados como el Modelo Estándar. Como he dicho en éste la materia conocida es un compuesto de cuarc y leptones sujetos a tres clases de interacciones fundamentales: la electromagnética, la débil y la de color. También he mencionado que la existencia de estas interacciones implica que haya otra decena de familias de partículas más: los fotones, los bosones  $W^+$ ,  $W^-$  y  $Z$ , así como ocho tipos de gluones. Aunque es sorprendente cuan pocos “átomos” son ahora necesarios para explicar todo el mundo material, los físicos sospechan que es posible una descripción atómica con un número menor de partículas fundamentales. Sin embargo el Modelo Estándar tiene un defecto mayor: no incluye a la fuerza gravitacional.

La ausencia de la fuerza gravitacional en el atomismo que he descrito no causa mayores dificultades pues la magnitud de ella es mucho menor que la de las otras interacciones. Por lo tanto las propiedades de la materia existente en la vida cotidiana y en los laboratorios actuales puede describirse bien sin incluir la acción gravitacional. Sin embargo, desde el punto de vista del conocimiento básico esto no deja de ser un defecto de nuestro saber. El problema que impide la inclusión de la fuerza gravitacional en las teorías atomísticas es que aún no sabemos cómo describir la gravedad en términos de la física cuántica.

Otro asunto que no puedo dejar sin mencionar es que los experimentos esenciales para explorar la naturaleza de la materia requieren de instrumentos muy especiales: los grandes aceleradores de partículas. Los más poderosos están ahora en los Estados Unidos y en Europa. Del primer caso cabe destacar el acelerador de protones llamado Tevatrón, construido en el Laboratorio Fermi que está situado en las afueras de la ciudad de Chicago. La parte principal de este instrumento es un anillo que tiene un diámetro de dos kilómetros, lo cual permite acelerar protones para moverlos a velocidades mucho muy cercanas a la de la luz y dotarlos de una gran energía. Los choques de partículas con estas propiedades permiten explorar la estructura profunda de la materia. El caso del laboratorio europeo –fundado por cooperación de muchos países, conocido por la siglas CERN (Centro Europeo para la Investigación Nuclear) y situado en Ginebra, Suiza– es muy semejante pues cuenta también con un acelerador de protones cuyo anillo es un poco mayor pues tiene un diámetro de 2.6 Km.

Para muchos de los observadores de la investigación atómica lo más notable es el haber construido los grandes aceleradores de partículas, no sólo por su magnitud y su costo, sino también por la finura y precisión con que funcionan. Esta opinión no es desdeñable pues, al menos, evoca la construcción de las pirámides egipcias y otras de las llamadas maravillas del mundo, las grandes catedrales europeas, las grandes obras de ingeniería realizadas en este siglo, o las naves espaciales que pusieron hombres en la Luna. A este juicio podrían oponerse, o añadirse, otros características más que muestren los logros del esfuerzo humano en su esfuerzo para desentrañar la naturaleza de la materia. Sin embargo sólo quiero aquí destacar, para finalizar, que la teoría atómica actual es un gran ejemplo de la capacidad humana para responder a las preguntas que le inquietan.

*Tecnología y Sociedad*, mayo-agosto 1999