

---

# ¿QUÉ ES LA MATERIA?

Luis Estrada

Reflexionar acerca de la materia es un interesante desafío. Por una parte se trata de volver a un tema que siempre ha apasionado al hombre; por otra, es una invitación a pensar en todo, especialmente cuando el tema se plantea desde el punto de vista de la ciencia. El mundo en que vivimos es material. Lo que nuestros sentidos perciben es materia. Buscando excepciones quizá pensemos en el mundo sonoro, aunque un rápido análisis nos confirmará que oímos gracias al aire en el que vivimos sumergidos. Nuestro cuerpo es material y si nos alejamos de nosotros mismos nuestro conocimiento, lejos de cambiar, se afirma. Todo es materia.

Lo anterior no debe tomarse como la declaración de que el mundo material agota al universo humano. Al escribir eso no he olvidado a la imaginación, a la poesía, al amor y a tantas otras cosas que enorgullecen al ser humano. Sin embargo el tono que he empleado para iniciar este escrito es el que debo tomar para considerar a la materia como lo hacen los científicos. Aclaro que me refiero a los científicos dedicados a la ciencia natural y la base de lo que sigue está en la hipótesis de que la sustancia de que todo está hecho es la materia. Por lo tanto, es claro que este escrito podría también haberse titulado "La estructura del Universo", o bien, "¿De qué están hechas las cosas que considera la ciencia?"

Mi tema es pues resumir lo que sabemos acerca de la estructura de la materia y mi conclusión será que ésta está formada por partículas fundamentales, por lo que mi tarea consistirá en explicar esta conclusión. Como se trata de una labor muy ambiciosa, lo que haré será presentar algunas reflexiones acerca de nuestro conocimiento del Universo para orientar al lector en el tema, dejando que los otros colaboradores de este número detallen y precisen algunos aspectos particulares de ese conocimiento. Empezaré por hacer algunas aclaraciones.

## *La organización de lo que sabemos*

Todo mundo sabe ahora que las cosas están hechas unas de otras. La vida actual, especialmente la urbana, hace que desde pequeños sepamos que lo que nos rodea son productos elaborados. Lo que poco a poco vamos aprendiendo es de qué están hechos esos productos y para comprenderlos mejor, tarde o temprano, deberemos organizar este conocimiento. La organización puede seguir varios criterios y casi siempre ocurre que tomemos como base el tamaño de las cosas, ya que es común pensar que lo grande está formado por partes pequeñas. Aunque este criterio es ingenuo para nuestros propósitos, lo aprovecharé para esbozar una primera organización de lo que forma el Universo.

La clasificación de objetos por su tamaño se hace tomando como medida nuestra propia dimensión. Así lo grande es el Universo astronómico ya que en él hay estrellas y otros objetos que sabemos que son mucho mayores que nosotros. El mundo pequeño está compuesto por objetos que no podemos ver a simple vista y que conocemos gracias a los microscopios. Los ejemplos que primero vienen a la mente son los virus y las bacterias, aunque muchos pensarán en átomos y moléculas. (Cabe aquí recordar que una bacteria es algo así como un millón de veces mayor que un átomo.) Finalmente hay que considerar los objetos de tamaño medio, esto es, aquellos cuya dimensión es semejante a la nuestra, como son los que usamos en la vida diaria. Cabe señalar que aún con esta simple clasificación hay problemas que resol-

ver; aunque estaríamos de acuerdo con que el agua, el aire y la arena son objetos de tamaño medio, habrá que pensar bien cómo aplicar el criterio del tamaño para justificar tal acuerdo. La noción de tamaño no es obvia cuando se trata de líquidos o de gases.

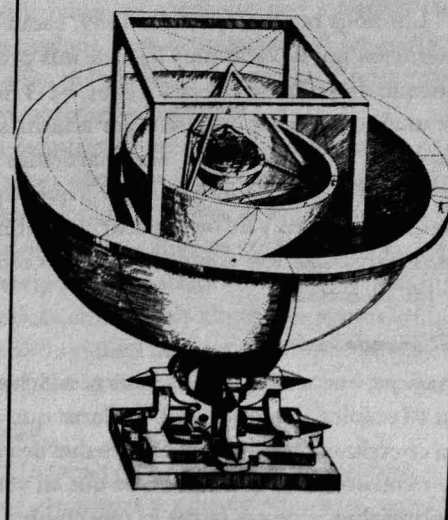
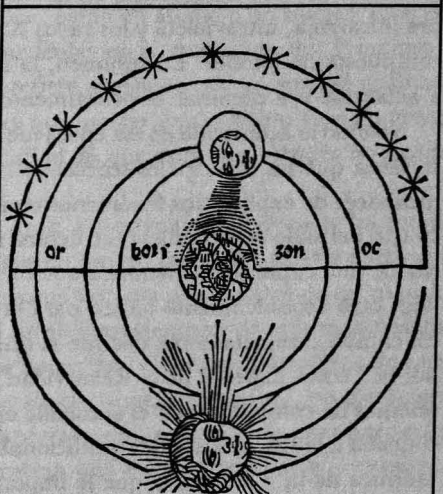
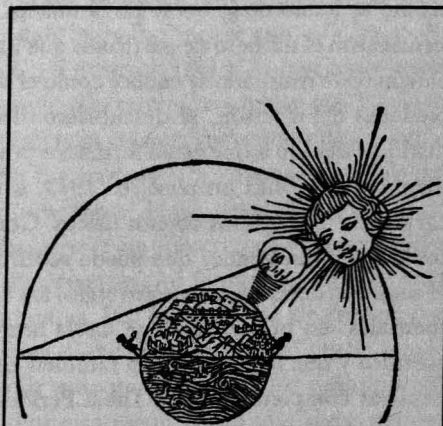
Otro criterio para organizar la estructura del Universo es distinguir lo complejo de lo simple. Este criterio requiere de un mayor conocimiento de la naturaleza de las cosas y hay que cuidar de su aplicación para no caer en tautologías. Sin embargo, en la práctica actual se emplea con buen éxito: una casa es un objeto complejo compuesto de ladrillos, concreto, madera, etcétera. Los productos industriales pueden describirse como una lista de partes y para dar un ejemplo considérese un automóvil. La cocina es uno de los mejores ejemplos de la reducción de lo complejo a lo simple ya que está organizada a partir de una colección de ingredientes básicos.

La ciencia ha organizado su conocimiento del Universo construyendo niveles diferentes que forman una jerarquía: cada nivel de organización es más complejo que el anterior. Lo más importante de este procedimiento es que hay uno simple y su descripción es el tema principal de este artículo. Antes de continuar debo recordar aquí que la ciencia está constituida por varias disciplinas que se formaron a partir del estudio de un aspecto particular del Universo y que cada una de ellas ha desarrollado su propio método de trabajo. De acuerdo con la tradición estas disciplinas son la astronomía, las ciencias de la Tierra, la química, la biología y la física. Cada una de estas disciplinas ha construido sus propios niveles de organización y ha establecido su jerarquía. *Grosso modo* estos son los siguientes: la astronomía considera tres niveles: el Universo en su totalidad, las galaxias y las estrellas y nos enseña que las galaxias son las componentes básicas del Universo y que las galaxias están formadas por estrellas. Los químicos dividen los objetos que estudian en elementos y compuestos y clasifican a los primeros mediante la Tabla Periódica. Los biólogos consideran un primer nivel formado por las plantas y los animales, un segundo compuesto por las células y un tercero integrado por las moléculas que forman a las células. Para los físicos los cuerpos están formados por moléculas o por átomos siendo estos últimos sistemas de electrones unidos por un núcleo atómico; los núcleos están formados por protones y neutrones y éstos son compuestos, como veremos más adelante. Para mis propósitos estos niveles con su jerarquía son los más convenientes, por lo que, en lo que sigue, cuando mencione la organización del conocimiento del Universo me referiré a la empleada por los físicos.

### Un poco de historia

La idea de que hay una materia simple de la que todo lo demás resulta por combinaciones apropiadas es tan antigua como la humanidad. Las primeras explicaciones de este tipo que conocemos provienen de la antigua Grecia, en donde algunos filósofos propusieron su noción de materia prima. Para Demócrito y Epicuro ésta estaba formada por átomos, pequeñas partículas indivisibles dotadas de movimiento, mientras que para Empédocles y Aristóteles lo básico eran los cuatro elementos. Los científicos del siglo XIX fueron quienes empezaron a construir la teoría atómica moderna y siguieron dos vertientes: los físicos imaginaron a un gas como una colección de partículas pequeñas en rápido movimiento y construyeron la Teoría Cinética de los Gases. Los químicos atacaron el problema buscando los elementos que forman las sustancias y sus esfuerzos fueron coronados por el descubrimiento de la Tabla Periódica de los Elementos. Antes de llegar a una síntesis de esos dos logros hubo nuevos descubrimientos que abrieron otros horizontes, al mismo tiempo que creaban problemas para lograr la síntesis buscada. Los más relevantes fueron el descubrimiento de la radioactividad, de los rayos X y del electrón.

Al iniciarse el siglo XX no todos los científicos estaban convencidos de que la materia exhibía una estructura atómica. Sin embargo los avances siguieron acelerándose. Max Planck descubrió que un emisor térmico ideal radiaba en porciones que eran múltiplos de una cantidad elemental, cuando la teoría correspondiente predecía que la radiación debía efectuarse de manera continua. Posteriormente Albert Einstein encontró que la luz también tiene estructura "atómica" por lo que muy





pronto se habló de fotones. En la misma época se realizaron experimentos que determinaron el número de partículas que hay en una porción de gas considerada como patrón (este resultado se conoce como el número de Avogadro), se midieron las propiedades del electrón, se descubrieron los isótopos (elementos químicos con pesos distintos debido a que están formados por núcleos atómicos diferentes) y, principalmente, Niels Bohr propuso, en 1913, un modelo de átomo que explicaba bien las características de esos objetos físicos. Como resultado de todos estos descubrimientos se logró un avance que puede resumirse diciendo que, antes de que terminara el segundo decenio de nuestro siglo, los científicos habían logrado dos éxitos fundamentales: en primer lugar se había aceptado que la materia tiene una estructura atómica y que los átomos son también compuestos. Con esta información se puede explicar completamente la Tabla Periódica de los Elementos, por lo que la fundamentación de la química quedó a cargo de la física. El segundo éxito logrado por los científicos fue que la luz, que es una parte de una familia mayor conocida como la radiación electromagnética, en la que también están comprendidas las radiaciones infrarroja, ultravioleta y los rayos X, tiene también estructura "atómica": está compuesta de fotones. En resumen, la idea de la estructura de la materia empezó a aclararse y a dominar el pensamiento de los científicos.

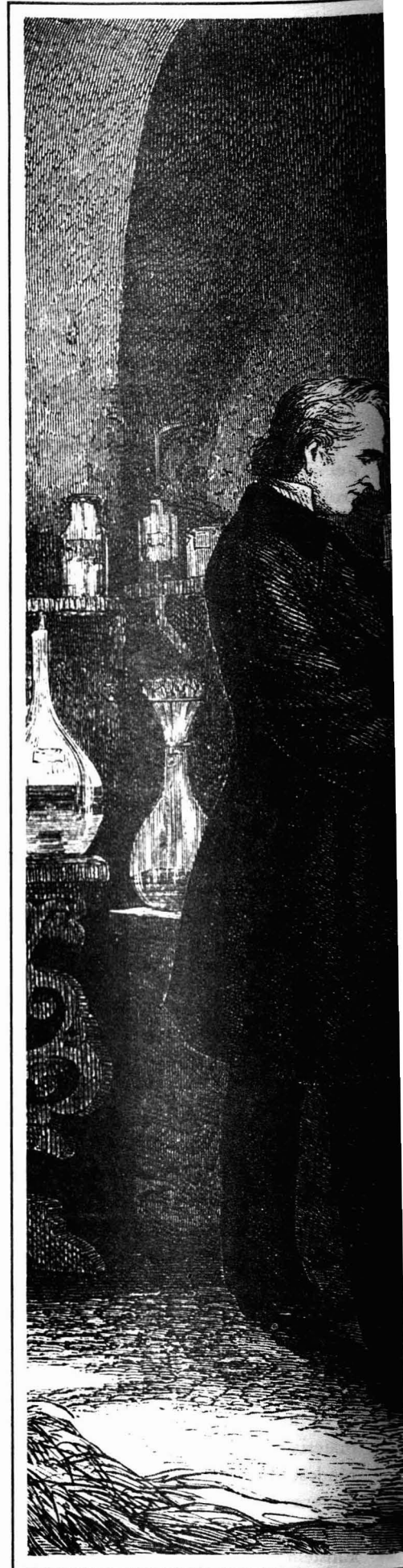
No todo lo acontecido en esa época fue un éxito. Desde el descubrimiento de Planck se sabía que las principales teorías de la física existentes hasta ese momento eran incapaces de explicar los fenómenos recién descubiertos. Así, al terminar el primer cuarto del siglo se admitía la estructura atómica de la materia, aunque no se disponía de una explicación científica que fundamentara su existencia. Debo mencionar aquí otro acontecimiento básico para la comprensión del Universo que sucedió en un campo completamente distinto al que nos ocupa, aunque influyó en su desarrollo: la Teoría Especial de la Relatividad, que Einstein publicó en 1905. Esta teoría, además de complicar más el ambiente científico del momento, ya que también modificaba a la física existente, condicionaba más la construcción de la esperada teoría atómica de la materia, ya que le imponía que fuera consistente con la posibilidad de la transformación de masa en energía.

La teoría atómica de la materia fue posible al iniciarse el segundo cuarto del siglo cuando Werner Heisenberg, Erwin Schrödinger y Paul Dirac inventaron la Mecánica Cuántica. Más adelante delinearé los rasgos principales de esa teoría pues debo terminar la brevísima historia a la que he dedicado esta sección. Entre 1926 y 1950 se descubrió que el electrón posee una característica muy extraña: tiene espín, lo que ocasiona que se comporte como si fuera un pequeño imán. Se descubrió también que hay antipartículas al conocerse la existencia del positrón (partícula que, excepto porque tiene carga positiva, presenta las mismas características que el electrón). Esta partícula fue la primera de una serie descubierta en el mismo periodo: al positrón siguieron el neutrón y los mesones pi y mu. Estas partículas contribuyeron a establecer que el núcleo atómico también presenta estructura "atómica" con lo que se consolidó la naciente física nuclear.

Los años recientes, 1950 a 1989, están llenos de descubrimientos cuya sola enumeración nos llevaría muy lejos de mis propósitos. Lo único que mencionaré, y esto porque después me referiré a ellos, es el descubrimiento de los cuarks. Éste se logró después de muchos esfuerzos por aclarar si las componentes del núcleo atómico, los protones y los neutrones, eran partículas fundamentales. Alrededor de 1964, Murray Gell-Mann elaboró una teoría que explica la estructura interna de los protones, de los neutrones y de otras partículas subnucleares. De acuerdo con esa teoría todas esas partículas son compuestas, así como lo son los núcleos atómicos, los átomos y las moléculas.

### *El mundo cuántico*

Aunque mencioné a Heisenberg, a Schrödinger y a Dirac como los creadores de la Mecánica Cuántica, debo aclarar que ésta es una obra colectiva que requirió de la contribución de una gran variedad de esfuerzos personales y de muchos años para ser construida, y puede decirse que su versión actual no es anterior a 1950. Lo más sobresaliente de esa teoría es que emplea un nuevo concepto de partícula, construi-





do a partir de la observación del comportamiento de los objetos microscópicos, en especial de los fotones y de los electrones. Este logro fue posible gracias a los avances de la física realizados a fines del siglo XIX y a principios del XX, que antes enumeré. Se realizaron entonces experimentos que mostraron claramente que los fotones y los electrones no pueden ser considerados como las partículas que elaboró la física clásica. Para empezar, la noción de fotón fue propuesta a principios de este siglo.

La comparación del comportamiento observado de los electrones y los fotones mostró más semejanzas entre estas partículas que las que eran de esperarse del conocimiento derivado de la física clásica. Por ejemplo, los fotones, como los electrones, muestran individualidad: se pueden contar. Por otro lado los electrones, como los fotones, tienen propiedades ondulatorias. Cabe recordar que se puede emplear cualquiera de esas partículas para construir microscopios y que los más poderosos de esta época funcionan con electrones. Por esta razón, en lo que sigue emplearé la palabra partícula en el sentido de la Mecánica Cuántica, esto es, la usaré para denominar a los objetos microscópicos como los electrones, los fotones o las componentes de un cuerpo con estructura atómica, como un átomo o un núcleo. Con esto presente diré que cuando se habla de partículas en el enunciado del Principio de Indeterminación de Heisenberg, uno se refiere a objetos que no son las partículas de la física clásica y a ellos es a quienes hay que asociar una posición y un momento. El resultado es que no hay ninguna dificultad en que estas magnitudes no puedan ser medidas simultáneamente.

Hasta este momento he subrayado la gran semejanza que hay entre los fotones y los electrones, en parte para resaltar que en ambos casos se trata de partículas. Debo ahora hablar de sus diferencias, máxime que son dominantes en las manifestaciones más usuales de esas partículas. Los mejores ejemplos de esas manifestaciones son la luz y los haces electrónicos que hacen funcionar los cinescopios de nuestros televisores. En estos casos los fotones y los electrones parecen ser completamente diferentes. La explicación está en el comportamiento colectivo de esas partículas: los fotones son "sociables", esto es, muestran una enorme tendencia a reunirse y a cooperar mientras que los electrones se comportan de manera opuesta: son "individualistas" ya que no pueden ocupar el mismo "lugar" al mismo tiempo. Esta propiedad constituye el Principio de Exclusión, descubierto por Wolfgang Pauli en 1925, que es el responsable de la estructura de los átomos. En éstos los electrones se acomodan de manera que cada uno ocupa su "lugar". Así el átomo forma una estructura estable que puede visualizarse como una sucesión de capas superpuestas. Estas capas sustituyen ahora a las órbitas electrónicas que Bohr imaginó cuando propuso su modelo planetario del átomo.

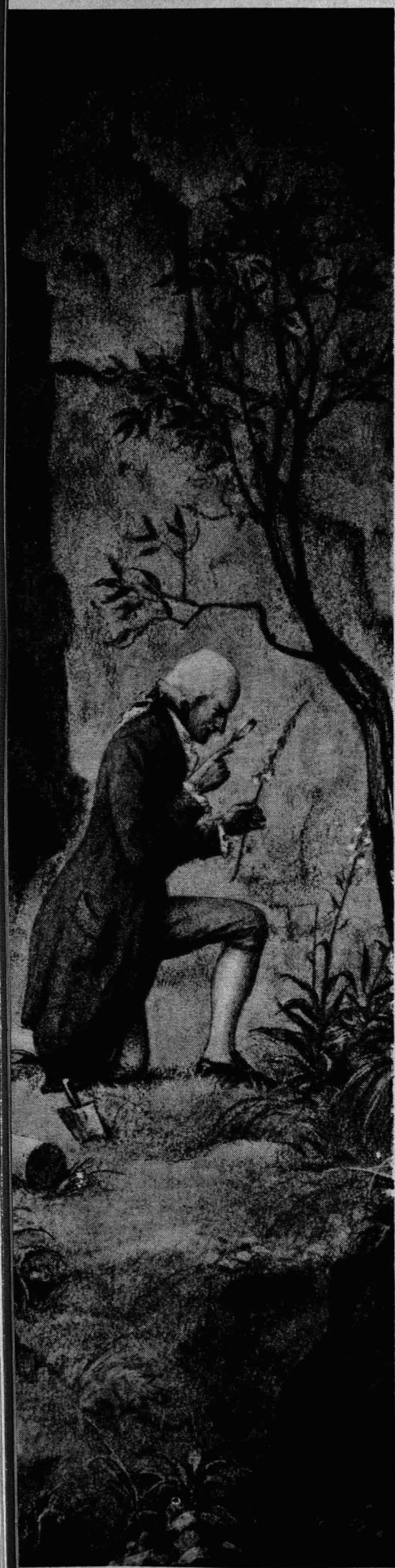
El comportamiento colectivo de las partículas que acabo de mencionar, es otra de las características que la Mecánica Cuántica incluye en su noción de partícula. Esta característica es esencial ya que se sabe ahora que las partículas sólo pueden comportarse de alguna de las dos maneras antes descritas: o son "sociables" como los fotones, o son "individualistas" como los electrones. Una manera más técnica de decir esto estaría basada en distinguir entre las partículas que cumplen con el Principio de Exclusión y las que no lo acatan. Para distinguirlas, a las partículas del primer tipo se les llama bosones y a las del segundo, fermiones. En síntesis las partículas del mundo microscópico son bosones o fermiones.

Otra característica de la descripción cuántica de los fenómenos naturales es que es probabilística. Así, cuando se desea saber dónde está una partícula, la Mecánica Cuántica sólo nos permitirá conocer la probabilidad que hay de encontrarla en cada lugar posible. Esta peculiaridad conmocionó a todos cuando empezó a saberse y todavía hay quienes no la aceptan. La descripción probabilística de las partículas está muy relacionada con que éstas son idénticas entre sí (los electrones son todos iguales, por ejemplo), por lo que resultan indistinguibles para propósitos de su observación. Lo que podemos saber de ellas es cuántas hay en la región que estudiamos.

#### *La materia: su historia y sus componentes*

He dicho que el material que forma el Universo está compuesto por átomos o por moléculas, que éstos están formados por electrones y núcleos atómicos, que estos





últimos están hechos de protones y de neutrones, los cuales, a su vez, están formados por los cuarc. Hasta donde sabemos estos últimos son indivisibles como lo son los electrones, por lo que nuestro deseo parece haberse cumplido: los cuarc y los electrones son los “átomos” modernos y la materia está hecha de ellos. Debo aclarar que estoy simplificando mucho las cosas ya que sólo pretendo esbozar un panorama de lo que ahora sabemos. Para mejorar ese panorama y explicar más la estructura que acabo de describir consideraré otro aspecto de la materia: su duración. Los materiales que ahora conocemos no han existido siempre. Si pensamos en la madera, sabemos que hubo una época en que no existía, ya que la vida vegetal se inició en un momento dado. Las rocas y los minerales también cuentan con cierta edad, ya que la Tierra tuvo un principio. Mas todavía, las estrellas también nacen. La ciencia ha descubierto que la secuencia que mencioné para describir la estructura de la materia es la que siguió el Universo en su formación. Describiré ahora, a grandes rasgos, la historia de la materia, esto es, la del Universo.

A partir de la Gran Explosión que creó el Universo, hubo una serie de procesos “cataclísmicos” que hicieron que el Universo, al cumplir su cien mil quintillonésimo de segundo de edad, fuera una “sopa de cuarc”, contaminada por una gran cantidad de electrones, neutrones, fotones y sus respectivas antipartículas. Hubo que esperar hasta que el Universo cumpliera un centésimo de segundo para que empezaran a formarse los protones y los neutrones. Cuando habían pasado un poco más de tres minutos de la Gran Explosión, aparecieron los primeros núcleos que después formarían los átomos y las moléculas. De esta brevísima historia que acabo de hacer sólo necesito detallar un poco más lo último. El Universo astronómico empezó cuando hubo disponibles núcleos simples: el del Hidrógeno y el del Helio. *Grosso modo* puede decirse que la materia del Universo era entonces: núcleos de Hidrógeno y de Helio, electrones, fotones y neutrinos y que esta situación duró un buen tiempo (unos 700 000 años). Después los núcleos empezaron a formar átomos y gracias a la fuerza de gravedad, la materia empezó a coagularse para originar estrellas y galaxias. Esto sucedió aproximadamente hace unos diez mil millones de años. La vida se originó en la Tierra hace tres mil quinientos millones de años y desde entonces existe casi toda la materia que ahora conocemos.

Fue hasta principios de este siglo cuando empezaron a añadirse otras sustancias al Universo, ya que empezaron a fabricarse los materiales sintéticos. Primero fue la baquelita, algunos decenios después el hule sintético, luego los plásticos y ahora sería interminable tan sólo enumerar los nombres de los nuevos materiales. Como grandes familias de materiales en los que hay más nuevos miembros mencionaré solamente a los polímeros, a las cerámicas, a los cristales líquidos, y a los metales orgánicos. Algunos materiales se denominan en relación a sus propiedades, por lo que se habla de los semiconductores y de los superconductores y entre éstos también hay nuevos elementos. Lo aquí importante es notar que el número de sustancias que forman el Universo sigue aumentando.

He delineado cómo entendemos la estructura de la materia: está organizada en forma jerárquica y cualquier material puede reducirse a átomos, éstos a núcleos, que están hechos de protones y neutrones y éstos de los cuarc. Repito nuevamente que mi relación es muy simplificada y debo precisarla más explicando ahora qué es lo que une a esas partículas. El pegamento en los niveles atómico y molecular es la fuerza electromagnética: los núcleos son objetos electrizados y los electrones también, por lo que se atraen y forman sistemas ligados. Las fuerzas que estructuran las moléculas son también de carácter electromagnético, aunque en general no se presentan en la forma tan directa como aparecen en el caso atómico. No es éste el lugar para detallar las diversas formas que toma la fuerza electromagnética para armar las moléculas. Lo importante es que los mundos atómico y molecular son posibles gracias a la fuerza electromagnética.

En el caso nuclear las cosas son diferentes y la responsabilidad de la estructura recae en dos fuerzas: la nuclear y la débil. Respecto a la ligadura de los protones y los neutrones para formar núcleos, la fuerza importante es la nuclear y ésta actúa entre los cuarc. Tampoco puedo entrar aquí en los detalles que conocemos acerca

de estas fuerzas y sólo mencionaré dos hechos importantes: el primero es que las partículas que componen un material están unidas por una fuerza. Por ejemplo, los electrones están ligados a los núcleos atómicos gracias a la fuerza electromagnética, ya que son partículas cargadas eléctricamente. El mismo patrón se repite en todos los casos: las partículas se unen para formar un compuesto gracias a que hay una fuerza que causa esa unión. El segundo hecho es que las fuerzas, como la materia, también se pueden reducir a un conjunto básico, en este caso, de fuerzas fundamentales. Ahora sabemos que hay cuatro: la fuerza electromagnética, la nuclear, la débil y la gravitacional. Cualquier otra fuerza puede entenderse en términos de alguna de éstas o de la combinación de algunas de ellas.

El estudio de las fuerzas fundamentales es una parte esencial del conocimiento de la materia. Acabo de mencionar que sabemos que sólo hay cuatro y debo añadir que también conocemos que tres de ellas, la electromagnética, la nuclear y la débil presentan estructura "atómica", la cual se describe también con ayuda de la Mecánica Cuántica. Según esta disciplina las partículas se unen mediante un agente físico que existe junto con ellas. Es justo aclarar que este agente empezó a estudiarse desde el siglo pasado y fue denominado campo. Así, Jame C. Maxwell construyó la Teoría Electromagnética explicando las atracciones y repulsiones de los cuerpos electrizados como el resultado de que éstos estaban sujetos a un campo: el campo electromagnético. Lo que la Mecánica Cuántica añadió a este conocimiento es que este campo también tiene estructura: está formado por partículas. Entre éstas se cuentan los fotones, que son los responsables de la fuerza electromagnética así como las partículas llamadas W y Z, descubiertas por Carlo Rubbia en 1983, que son las causantes de la fuerza débil. En el caso de los cuarc, éstos están unidos por una familia de partículas llamadas gluones y, como ya antes indiqué, hay una fuerza cuya estructura todavía ignoramos: la fuerza gravitatoria. Es curioso este hecho, ya que esta fuerza fue la primera que conocimos y la que hemos empleado con buen éxito para describir el Universo en grande. Se cree que ella también debe tener estructura "atómica" y que podrá entenderse en términos de gravitones. Sin embargo esto es todavía una hipótesis. Lo que además podemos asegurar es que las partículas que forman las fuerzas, esto es, el fotón, la W, la Z y los gluones son bosones, mientras que los cuarc y los electrones son fermiones. Por lo tanto, para redondear el panorama de la estructura de la materia que estoy presentando, hay que añadir la estructura de las fuerzas y cambiar la idea de que las partículas se unen para formar compuestos gracias a la acción de una fuerza, por el nuevo conocimiento de que los fermiones interactúan entre sí mediante un intercambio de bosones. El lector habrá notado ya que se trata de un cambio muy radical. Antes se pensaba en materia y fuerzas que la estructuraban. Ahora las explicaciones se dan en términos de fermiones y bosones. La materia prima del Universo, que incluye su "pegamento", está constituida únicamente por partículas.

Simplificando más la descripción de la estructura de la materia, resumiré lo dicho de la manera siguiente: los cuarc, gracias a la fuerza nuclear, se unen para formar protones y neutrones y éstos, con ayuda de la misma fuerza estructuran los núcleos atómicos. Con estos últimos y con electrones y fuerzas electromagnéticas, se forman los átomos y las moléculas, ingredientes que componen todo lo que conocemos del Universo. He introducido también una estructura "atómica" en las fuerzas fundamentales: los gluones son los "átomos" de la fuerza nuclear y los fotones son los correspondientes de la fuerza electromagnética. Así un protón es un sistema compuesto por tres cuarc unidos por la acción de los gluones y un átomo de hidrógeno es un electrón ligado a un protón gracias a los fotones. La materia prima del Universo está formada por partículas fundamentales entre las que se cuentan los cuarc, los electrones, los fotones y los gluones. Otras partículas fundamentales son menos relevantes para una imagen tan simplificada como la que aquí he presentado. Lo esencial de la descripción del Universo es que hay objetos simples que nos permiten entender un mundo complejo. La materia está formada por "átomos", aunque nuestro concepto actual de "átomo" es completamente distinto del que teníamos hace apenas unos años. ♦

