

FÍSICA DE PARTÍCULAS ELEMENTALES

ARNULFO ZEPEDA

ENCONTRAR LOS BLOQUES FUNDAMENTALES CON QUE LA NATURALEZA fabrica todos los objetos materiales ha sido una de las tareas que ha fascinado a la humanidad desde tiempos inmemoriales. Ya como parte de la ciencia, este problema se abrió paso dentro de la química del siglo XIX, hasta establecer la existencia del átomo y con el descubrimiento del electrón y la radioactividad pasó a ser parte de la física a finales de ese mismo siglo. Pero es sólo a partir de los inicios del siglo XX cuando el área de Física de Partículas Elementales toma cuerpo, al mismo tiempo que se establece que el núcleo atómico se compone de protones y neutrones y se descubren partículas inesperadas en los rayos cósmicos, tales como el muón, el pión y el kaón. Con el advenimiento de los aceleradores se produjo en el laboratorio una gran variedad de partículas con interacciones nucleares, también llamadas interacciones fuertes. A este tipo de partículas se les denominó hadrones para diferenciarlas de las que no presentan interacciones fuertes: los leptones.

En la segunda mitad del siglo XX se construyó la teoría de los quarks, como los bloques de los que se componen los hadrones. La existencia de los quarks quedó establecida experimentalmente en la década de los setenta. Por otra parte el análisis detallado de la radioactividad condujo a entender que existe otro tipo de interacciones, además de las fuertes y las electromagnéticas (éstas últimas responsables de las propiedades químicas de los elementos) a las que se les llamó interacciones débiles para denotar que su intensidad es mucho menor que las electromagnéticas que a su vez son de menor intensidad que las fuertes.

En el mundo atómico y subatómico impera la mecánica cuántica. Por otra parte la magnitud de las energías que se manejan para escudriñar el mundo subnuclear requiere del uso de la mecánica relativista, la cual es superior a la mecánica de Newton. La mecánica relativista fue formulada por Albert Einstein en 1905, hace 100 años, hecho que se celebra en el 2005. La diferencia fundamental entre la mecánica de Newton (o clásica) y la relativista es que en la primera las señales, o sea aquello que permite las observaciones, viajan a una velocidad infinita mientras que en la última viajan a la velocidad de la luz que

es finita e independiente del sistema de referencia (dentro del conjunto de sistemas de referencia inerciales o no acelerados).

La formulación conjunta de la mecánica cuántica y la mecánica relativista se expresa adecuadamente en el lenguaje de la Teoría Cuántica del Campo, que es capaz de describir la aniquilación y la creación de partículas, sus decaimientos y sus interacciones. Así, las teorías sobre física de las partículas elementales se describen con el lenguaje de teoría cuántica del campo. Encontrar el conjunto de las genuinas partículas elementales es tarea de la interrelación entre la física experimental y la física teórica.

Gracias a las investigaciones llevadas a cabo hasta mediados de la década de los setenta se concluyó que las partículas verdaderamente elementales (hasta donde alcanzan a discernir el esquema y los instrumentos actuales) son los llamados leptones (que como el electrón no tienen interacciones nucleares) y los quarks (que componen al protón, neutrón y demás hadrones, que son las partículas compuestas que tienen interacciones nucleares). En cuanto a los leptones se refiere hay 6, tres cargados y tres neutros, éstos últimos son los neutrinos. De los quarks también hay 6, todos de carga fraccionaria (en unidades de la carga del electrón), pero de cada quark hay tres copias que se diferencian entre sí por un número cuántico nuevo, que a falta de códigos apropiados se denomina "color". Los leptones y quarks se pueden agrupar, según sus interacciones débiles, en tres familias, cada una de las cuales contiene dos leptones, uno cargado, como el electrón, y uno neutro, o sea un tipo de neutrino, y dos quarks, uno de carga $2/3$ y otro de carga $-1/3$ y cada uno en tres colores. La clasificación y propiedades de leptones y quarks se ilustra en la tabla 1 del artículo precedente.

La variedad de partículas, elementales y compuestas, sugirió, en cada etapa histórica, el uso de simetrías para entender las relaciones entre

ellas. Una simetría existe cuando la expresión matemática de las leyes de la física es independiente (invariante) del sistema de referencia, ya sea espacio-temporal o del espacio abstracto donde varían los números cuánticos que caracterizan a las partículas. Las simetrías que relacionan partículas entre sí las llamamos simetrías internas para diferenciarlas de las espacio-temporales. De éstas últimas son ejemplos conocidos la simetría rotacional que permite la clasificación de estados atómicos y la simetría de Lorentz que es la base de la teoría de la relatividad. El lenguaje apropiado para manejar simetrías es la teoría de grupos. La búsqueda de la simetría responsable de las similitudes entre los hadrones condujo a la formulación de la teoría de quarks, como base del espacio donde opera el grupo clasificador de hadrones $SU(3)$. Aparte de los grupos de clasificación existen los que corresponden a simetrías espontáneamente rotas. Decimos que cierta simetría está espontáneamente rota si el estado base del universo, en su correspondiente fase, no es neutro respecto del correspondiente grupo. La simetría queda así rota no en la expresión de la dinámica del sistema, sino por su estado base. Dicho detalle impide que este tipo de grupos sirva para clasificar estados (partículas), pero conduce a otras manifestaciones que nos permiten identificar dicha simetría, una de ellas es la existencia de una partícula sin masa denominada Bosón de Goldstone. Un sistema típico con simetría espontáneamente rota es un ferromagneto para el cual el estado base, debajo de cierta temperatura crítica, consiste en un estado con todos sus dominios magnéticos orientados en la misma dirección, lo cual rompe la simetría rotacional.

El papel de las simetrías en la física de partículas elementales subió a un rango superior en la década de los cincuenta cuando se les identificó como determinantes de la dinámica al postularse como simetrías locales, es decir cuando se exige que las transformaciones que forman

el grupo correspondiente varíen de punto a punto en el espacio cuatridimensional cotidiano. A éstas se les denomina simetrías de norma y para que sean exactas se requiere la existencia de campos que representan las fuerzas (las partículas cuyo intercambio entre las partículas ordinarias son la causa de las interacciones conocidas o de nuevas interacciones). Así la interacción electromagnética es consecuencia ineludible de la simetría de norma asociada al grupo $U(1)$, las interacciones débiles junto con las electromagnéticas resultan de la simetría de norma $SU(2) \times U(1)$, y las interacciones entre quarks de una simetría de norma $SU(3)_c$ que opera en el espacio tridimensional de “color”.

Sin embargo las partículas responsables de interacciones deben ser de masa cero, como el fotón, si las simetrías de norma son exactas y explícitas. Esta última cualidad es opuesta a la de ser espontáneamente rota. Al ser un hecho experimental que las interacciones débiles (responsables de la radioactividad) son de muy corto alcance, deben ser entonces los mediadores de esta interacción de masa muy grande. Esto sólo se concibe si la simetría de norma correspondiente a esta interacción se encuentra espontáneamente rota. Para que dicho fenómeno acontezca es necesario un ingrediente adicional en el modelo o cuadro completo. Este nuevo ingrediente puede ser un bosón especial llamado Higgs cuya existencia aún no ha sido establecida experimentalmente y cuya búsqueda es uno de los motivos principales detrás de la construcción de nuevos aceleradores gigantescos, como el LHC en el CERN.

Aun así, con ingredientes todavía no establecidos experimentalmente, la enorme canti-

dad de datos experimentales en un gran intervalo de energías y de pruebas de precisión nos indica que el esquema actual, denominado Modelo Estándar (ME), es al menos parte real de la teoría correcta. Este conocimiento es uno de los grandes logros del siglo XX. Alcanzarlo ha requerido un enorme esfuerzo de físicos teóricos y experimentales en todo el mundo. Entre las contribuciones sobresalientes se encuentran varias de los miembros del grupo de Altas Energías (o grupo de Partículas Elementales) del Departamento de Física del CINVESTAV.

El ME consiste entonces en un contenido de materia, los quarks y los leptones en tres familias, con una dinámica dictada por la simetría de norma $U(1) \times SU(2) \times SU(3)_c$ y con un elemento adicional, el Higgs, responsable de la rotura (parcial) espontánea de $U(1) \times SU(2)$.

En el ME los neutrinos no tienen masa, su masa es cero. Las demás partículas elementales sí tienen masa pero el valor de cada masa no es calculable dentro de este esquema, lo cual constituye una de las deficiencias del ME. Hay otros detalles que el modelo no puede determinar a partir de los principios en los que se basa. Por ejemplo no nos dice por qué hay tres familias ni por qué las simetrías básicas de norma son $U(1)$, $SU(2)$ y $SU(3)_c$, ni cómo es que realmente surge la rotura espontánea de la parte electrodébil [$SU(2) \times U(1)$].

Tratando de remediar las insuficiencias del ME se han postulado otras teorías basadas en grupos de simetría mayores, incluyendo aquellas de “unificación” basadas en grupos en los que están contenidos los factores $U(1)$, $SU(2)$ y $SU(3)_c$, sin ser un simple producto de éstos, como es el

caso de $SU(5)$. La idea actual de unificación de las fuerzas (Einstein fue también uno de los precursores de la idea de unificación) está apoyada por la observación teórica y experimental, de que la intensidad de las interacciones varía con la energía y que la intensidad de las interacciones electromagnéticas, débiles y fuertes, tienden las tres, a ser de la misma magnitud a muy altas energías. Si esta es la situación, si se igualan las intensidades de las interacciones y la dinámica corresponde a un grupo simple como $SU(5)$, entonces hay en la naturaleza a altas energías una sola interacción, un único principio de dinámica, del cual las tres interacciones conocidas son sólo diferentes facetas, como distintas facetas son la electrostática y la magnetostática de una sola teoría que es la electrodinámica formulada por Clark Maxwell en el siglo XIX (1873). Existen diversas posibilidades de extensión del ME con y sin unificación. Diversas extensiones conducen a consecuencias diferentes que sólo los resultados experimentales del futuro podrán validar o refutar. Las posibles extensiones del ME sobrepasan los esquemas “clásicos” y llegan a proponer la existencia de dimensiones extras, adicionales a las cuatro “cotidianas” a las que estamos acostumbrados. En nuestro grupo se evalúa a través de un análisis profundo esta posibilidad que hasta ahora se mantiene consistente matemáticamente y que habrá que poner a prueba en experimentos de altas energías y de gran precisión.

Por otra parte, en nuestro grupo de altas energías también se trabaja en calcular las consecuencias experimentalmente observables de otras posibles extensiones del ME, formuladas en las

cuatro dimensiones usuales. En particular se han construido varios modelos de extensiones, con y sin supersimetría (la simetría que surge de la invariancia ante transformaciones de bosones a fermiones y viceversa).

Como mencionamos arriba, en el ME el neutrino no tiene masa. Tampoco es difícil extender levemente las premisas de este modelo para acomodar un neutrino con masa. Habíamos explicado ya que en el ME el neutrino no tiene masa. Sin embargo recientemente se ha determinado, a partir de la medición del flujo de neutrinos en la atmósfera (producidos por rayos cósmicos) y de los provenientes del Sol, que los neutrinos sí tienen masa, pero extremadamente pequeña. Esta pequeñez sería entendible dentro de una extensión del ME que contuviera otro neutrino muy pesado y que se mezclara con el neutrino estándar. Sería de esta mezcla que el neutrino estándar adquiriría una pequeña masa. Los profesores del grupo de partículas elementales del CINVESTAV han trabajado y trabajan en investigar las posibles propiedades adicionales del neutrino aparte de su masa. Por ejemplo se estableció, por vez primera, una definición consistente del tamaño del neutrino dentro del ME. Se ha establecido también por profesores de este Departamento de Física, que si el neutrino tiene momento magnético, éste deberá ser menor que el del electrón en alrededor de doce órdenes de magnitud.

Los neutrinos también fungen como magníficos mensajeros del universo. Dada su leve interacción con la materia pueden viajar distancias astronómicas sin que su trayectoria sufra desviaciones. Para detectar estos neutrinos es necesario construir o habilitar detectores gi-

gigantescos, así como llevar a cabo cálculos precisos sobre el flujo de neutrinos provenientes de diversas fuentes extraterrestres y la posible capacidad de detectarlos en los aparatos que están en construcción. Estos cálculos también se realizan en el CINVESTAV. Por otra parte, los rayos cósmicos formados de partículas cargadas de origen astrofísico, también pueden transportar información sobre eventos u objetos lejanos a la Tierra si su energía es suficientemente grande. En este caso también es necesario construir detectores gigantescos, como el Observatorio Pierre Auger, en cuya construcción y operación participan miembros del grupo de partículas elementales del CINVESTAV.

Podemos afirmar que son los quarks y los leptones, el contenido de materia del modelo estándar, las componentes fundamentales de todo lo material que conocemos, aquí en la Tierra y fuera de ella, tanto de planetas como de todo lo que brilla en cualquier parte del espectro electromagnético visible e invisible. Esta materia conocida es también la responsable de los fenómenos que producen las diversas manifestaciones conocidas de energía. Pero esta materia y energía conocidos constituyen sólo una pequeña parte de lo que es el universo. Las obser-

vaciones astrofísicas de los últimos 15 años indican que, en el balance de energía y materia que llena este universo, domina una componente desconocida de energía llamada “energía oscura” con un 73%, siendo el resto, un 27%, materia. Pero de la parte material sólo el 15% está compuesta de lo conocido. El resto, el 85% de la materia, es llamado “materia oscura”. Ésta no ha sido aún detectada directamente, sólo a través de sus efectos gravitacionales astronómicos.

Otra gran pieza faltante en el modelo estándar es la interacción gravitacional, descrita con gran éxito por Einstein con su Teoría General de la Relatividad, debido a que todavía no ha sido posible formularla dentro de la mecánica cuántica.

Se requiere entonces de la formulación de un nuevo esquema que abarque al ME y la relatividad general y explique el misterio de la materia y energía oscuras. Para alcanzar con éxito esta meta será necesaria una nueva serie de experimentos tanto de laboratorio (LHC, NLC) como de detección de fenómenos astrofísicos (rayos cósmicos, candidatos a materia oscura, neutrinos extra-solares, etcétera) y una serie de ajustes entre las posibles diversas teorías (extensiones del ME) y observaciones experimentales. Éstas son las tareas de la física fundamental del siglo XXI.