

LA MATERIA AYER Y HOY*

Ramón Méndez Galain

Instituto de Física
Facultad de Ingeniería

Introducción

En el año 1897 se descubrió el electrón, la primer partícula elemental encontrada experimentalmente. Su descubridor, Thompson, como buen inglés, definió al átomo como un budín de pasas de uva. Este átomo estaba formado por electrones en un mar de cargas positivas, ya que él sabía que los átomos eran neutros eléctricamente.

Hoy en día, la imagen más reconocida del átomo, es la que aparece como símbolo de la Agencia Internacional de Energía Atómica, que ubica al núcleo en el centro con electrones girando a su alrededor, en una estructura similar a la del sol y los planetas. Sin embargo esta visión es en realidad tan falsa como la de Thompson hace 100 años. La única “representación” correcta del átomo está dada por un conjunto de complicadas ecuaciones. Es que tratar de explicar, con imágenes conocidas, la visión del mundo microscópico, se hace extremadamente difícil, sino realmente imposible.

Tal vez la manera más pictórica de describir la estructura de la materia la aporten las famosas muñecas rusas: esa sucesión de muñecas similares, una metida dentro de la otra, es muy similar a lo que se ha ido descubriendo a lo largo del siglo XX. En efecto, cada vez que creemos encontrar las “verdaderas” partículas elementales, unos años después se verifica que estas no eran sino objetos compuestos por otras partículas menores y aún más elementales.

El esquema de esta exposición es el siguiente: En primer lugar trataré de mostrar por qué a comienzos de siglo hubo una verdadera revolución desde todo punto de vista - conceptual, metodológico y filosófico -, tirando por la borda el mundo llamado clásico de fines del siglo XIX y cuestionando, en particular, las bases que sustentaban el conocimiento de la estructura de la materia. Luego de esta motivación inicial, pasaré inmediatamente a describir un período de treinta años espectaculares, de la ciencia en general, no sólo de la física y mucho menos de la física de la materia, que fue el período del surgimiento de los dos grandes paradigmas del siglo XX, desde el punto de vista de la física: la teoría de la relatividad y la mecánica cuántica. Con estas herramientas, me aventuraré brevemente a describir qué se aprendió a lo largo de este siglo y cómo se entiende hoy en día lo que es realmente la estructura de la materia. Para terminar, intentaré marcar, más que algunas conclusiones, cuáles son las preguntas sin respuestas que quedan hoy.

1.- Una revolución múltiple

Nuestra concepción del mundo sufrió a comienzos del siglo XX el impacto de una revolución multifasética.

(1) Desde el punto de vista filosófico se echó por tierra el determinismo que había sentado todas las bases de la ciencia durante mucho tiempo. Entró en juego la importancia del observador. El sujeto que

* Versión corregida por el autor.

estudia al objeto científico es tan importante como el objeto mismo, dado que incide sobre él de manera esencial.

(2) La imposibilidad de hacer una representación concreta de cómo es el mundo microscópico aflora, justamente porque la intuición se vio totalmente revolucionada. La necesidad de abstracción, la necesidad de hacer medidas indirectas, devinieron esenciales. Hasta ese momento existía una relación muy directa con el objeto que se estaba midiendo, ahora se observa a través de aparatos electrónicos que agrandan “cosas” que son realmente muy etéreas. Por supuesto todos los resultados que ahora se obtienen están totalmente en contra de nuestra intuición más primitiva, y eso es muy difícil incluso para la cabeza de un científico.

(3) El ángulo de enfoque, o sea cómo se encara o se ve el problema, sufrió un cambio esencial. La dualidad onda partícula, la unificación de las interacciones, la unificación de la comprensión que tenemos del mundo microscópico y del mundo en general, y sobre todo el colocar en pie de igualdad lo que es la materia y lo que es la interacción de la materia: todo esto fue realmente un salto cualitativo importante.

(4) El punto de vista metodológico constituyó una gran revolución. Desde la perspectiva tanto teórica como experimental el abordaje metodológico sufrió un cambio esencial.

Así se gestaron dos grandes paradigmas: la teoría de la relatividad y la mecánica cuántica. La primera surge simplemente de la cabeza de un genio: Albert Einstein. Si bien existía en la época una serie de contradicciones entre teoría y experimentos, contradicciones que fueron indirectamente resueltas por la teoría de la relatividad, no existían observaciones experimentales sobre objetos moviéndose a altas velocidades, comparables con la de la luz. No había por lo tanto, en este sentido, ninguna contradicción entre lo experimental y lo teórico, que hiciera necesaria una nueva teoría que describiera “correctamente” el movimiento de objetos muy veloces. Esta teoría surgió simplemente de una persona completamente **aislada**, que realizaba “gedankenexperiment” (o experimentales “mentales”) y a partir de sus pensamientos desarrolló toda una teoría. No fue sino muy posteriormente que la teoría fue realmente demostrada experimentalmente. Como corolario de esta situación particular, Einstein nunca recibió el premio Nobel por su propuesta de la teoría de la relatividad, sino por su explicación del efecto fotoeléctrico, un asunto completamente desconectado del famoso “ $E = Mc^2$ ”.

Algo completamente diferente sucedió con la mecánica cuántica, que comenzó a surgir también a partir del año 1900 y terminó 30 años después, aunque todavía ahora se siguen discutiendo muchas de sus hipótesis. En ella sí hubo una contradicción entre la teoría clásica y los experimentos. Algunos de estos experimentos no se sabía cómo encajarlos dentro de la teoría. Al mismo tiempo, la construcción de este segundo paradigma, fue una obra claramente colectiva. Muchos fueron los científicos que participaron de este proceso (entre ellos Einstein) y muchos fueron los premios Nobel otorgados a lo largo de los años.

El resultado de ambos paradigmas fue una visión de la naturaleza sustancialmente diferente a la que se conocía a fines del siglo XIX. La comprensión de la estructura de la materia está en el centro de esta nueva visión.

2.- El mundo clásico de fines del siglo XIX

¿Cómo era o se veía el mundo a fines del siglo XIX? Para esto es bueno comenzar con el famoso diálogo entre Napoleón y Laplace. Napoleón pregunta: "Monsieur Laplace, ¿por qué El Creador no fue mencionado en su libro Mecánica Celeste?". Y Laplace responde: "Su excelencia, no preciso esa hipótesis". Esto sucedía hacia 1800 y marcó de alguna manera un vuelco muy importante en la

concepción científica y en la visión del universo. Hasta Newton, incluyéndolo, era imposible escribir un texto científico sin mencionar de alguna manera a Dios en el contexto. Esta no fue la visión a partir del siglo XIX y un poco antes tampoco.

En ese siglo se estableció con gran convicción que el universo en definitiva era una máquina muy compleja. Una enorme maquinaria, la cual tenía tres grandes patas, para la física del siglo XIX. Por un lado la mecánica, que había surgido ya más de 100 años antes con claridad a través de los trabajos de Galileo primero y de Newton después. Por otro lado el electromagnetismo, que había sufrido un cambio sustancial cuando Maxwell hacia los años 1870 logra unificar la electricidad y el magnetismo, y poner en juego una idea fundamental como la del campo. Por último la termodinámica, de alguna manera como una hermana menor y un poco más débil, también estaba surgiendo con gran claridad. Incluso se estaban comenzando a vislumbrar relaciones entre estas diferentes ramas de la física, fundamentalmente a través de la teoría cinética de los gases, que relacionaba la termodinámica con la mecánica newtoniana.

El determinismo hacía furor. La base de todo esto era el determinismo y sobre fines del siglo XIX más todavía el positivismo. Por ejemplo, Laplace decía que si le daban las condiciones en las que estaba el universo en ese momento, podía predecir como iba a ser dentro un millón de años, o como estaba hace un millón de años. Es decir, que conociendo las condiciones iniciales se puede predecir lo que va a pasar en un determinado sistema mecánico.

Otro hecho fundamental es que la física claramente era una ciencia experimental. Lo cual no es poca cosa, después de siglos en los cuales no necesariamente se consultaba a la naturaleza para ver si lo que se pensaba de ella era cierto o no. Todo eso llevó a una de las frases más notables, por equivocada, que la dijo Kelvin en el año 1900, quien además de ser un Lord de la corona británica era un excelente científico. Dijo: "La física fundamental ya fue toda descubierta, quedan apenas algunos pequeños detalles que serán rápidamente resueltos". Entonces se le cayó arriba un vendaval de cambios profundos como nunca había habido en la física.

¿Qué pasa con la materia concretamente en todo esto? Había tenido lugar el avance simplificador de los químicos, que usando la información de los alquimistas de siglos y siglos, se dieron cuenta que, en definitiva, con algunos ladrillos fundamentales llamados á-tomos (del griego in-divisibles) se podía constituir toda la materia que los rodeaba. Al decir toda la materia, no se referían sólo a la materia que los rodeaba en manera cercana. A fines del siglo XIX se encontró un resultado muy importante, y es que estudiando el espectro de las estrellas más lejanas o del sol y comparándolo con el de ciertos elementos en la tierra, resultan ser exactamente los mismos, concluyéndose que la química era universal, es decir que los mismos átomos que constituían la materia en la tierra eran los que constituían el resto del universo. Se entendía que había un lenguaje universal y ladrillitos básicos para construir la materia. Así fue que se llegó por ejemplo al modelo del átomo de Thompson.

Por suerte, Kelvin se equivocaba, y a la física le quedaban bastante más que unos pequeños problemitas sin resolver. En particular había tres problemas a destacar que dieron nacimiento a toda la revolución que surgió en los primeros años del siglo XX.

El primero es la radiación del "cuerpo negro". Un cuerpo negro puede ser simplemente un horno a determinada temperatura y que irradia calor a diferentes longitudes de onda, es decir irradia ondas electromagnéticas de diferentes longitudes. Algunas de estas ondas son visibles. Por ejemplo al calentar hierro en determinado momento se ve de color rojo, o blanco, y a otras temperaturas emite luz en un rango no visible por los ojos del ser humano, que tiene un rango de visión bastante pequeño, por cierto.

Pero existía una diferencia enorme entre la predicción teórica y los datos experimentales. Los datos experimentales podían observarse graficándose la “cantidad” de luz que sale, en función de la longitud de onda. En esta gráfica se veía que, para diferentes temperaturas, la forma de la curva iba cambiando, aunque siempre existía un máximo que se corría hacia longitudes de onda menores a medida que se aumentaba la temperatura. La comparación entre las predicciones teóricas y los datos experimentales, puede hacerse con dos modelos teóricos. Uno de los modelos, denominado Ley de Rayleigh y Jeans, es absolutamente clásico basado en la física del siglo XIX y ni siquiera predice que va a haber un máximo. El otro modelo, que es la ley de Wien, es bastante más empírico, si bien predice que va a haber un máximo, el comportamiento para grandes valores de la longitud de onda resulta altamente catastrófico. O sea que existe una diferencia sustancial entre las predicciones teóricas basadas en la física del siglo XIX y los datos experimentales sobre la radiación de un cuerpo negro.

Un segundo tema en el cual había también una gran diferencia entre la teoría y la práctica es el de las radiaciones espectrales, aquellas con las cuales se descubrió que había los mismos elementos en las estrellas que en la tierra. Si se toma luz blanca y se la hace pasar a través de un gas, por ejemplo hidrógeno, y luego se analiza con un prisma la luz que sale, es decir se hace una descomposición en colores, se observa que hay solamente algunas longitudes de onda. Es decir que algunos colores precisos de la luz pasan a través del gas ... pero todos los otros no. Esto es un espectro de absorción. Sucede algo similar con el espectro de emisión de las sustancias. Para obtenerlo se calienta el gas y este emite en longitudes de onda características, lo que se llama el espectro de emisión de ese determinado elemento. No se sabía por qué sucedía esto, no se tenía la menor idea de dónde venían estas rayas. Ningún modelo predecía este fenómeno.

Un tercer hecho que tampoco se lograba entender era el efecto fotoeléctrico. Si se envía luz sobre una placa, por ejemplo de metal, se pueden arrancar electrones. Lo interesante es que la emisión de electrones no depende de la cantidad de luz que se envía, o sea de la intensidad luminosa, sino que depende del color de esa luz. Es decir, el hecho de que puedan o no arrancarse electrones depende de la longitud de onda de la luz. Esto contradecía completamente toda interpretación clásica porque, se creía, si se envía mucha luz, cualquiera sea su longitud de onda, se está enviando mucha energía, que debería llegar a ser suficiente como para romper la energía de ligadura de un electrón y poder arrancarlo. Pero no sucedía así.

Estos tres grandes problemas, que para Kelvin eran solo algunos pequeños detalles que iban a ser resueltos rápidamente, en realidad reflejaban que la comprensión del mundo microscópico era extremadamente equivocada a fines del siglo XIX.

Pero también había algunos problemas que eran más metodológicos e incluso psicológicos. Boltzman, que había empleado correctamente la mecánica de Newton a través de la llamada teoría cinética de los gases, para describir el comportamiento de los mismos y explicar de alguna forma la termodinámica, no era muy respetado por sus colegas. Estos creían que era una forma apenas fenomenológica de describir las cosas, pero que en realidad no podía haber átomos chocando dentro de un gas, efectivamente produciendo las cosas que Boltzman predecía. Un filósofo y físico en el año 1883 escribió: "Los átomos no pueden ser percibidos por los sentidos. Como todas las sustancias son productos del pensamiento. Pero más aún, los átomos son dotados de propiedades que parecen contrariar a los atributos observados en los objetos. Incluso aunque la teoría atomística sea tan eficiente en la reproducción de ciertos hechos, el físico que abraza las leyes de Newton, sólo puede aceptar estas teorías como provisionarias intentando obtener de modo más natural una solución satisfactoria".

Boltzman sufrió mucho con todo esto y en el año 1889 escribió: "En mi opinión sería una gran tragedia para la ciencia si la teoría cinética de los gases fuese abandonada debido a una aptitud momentáneamente hostil, como la que aconteció por ejemplo con la teoría ondulatoria de la luz debido a la autoridad divina. Soy completamente consciente de ello, a pesar de ser apenas un individuo nadando tímidamente contra la corriente. Incluso así, tengo el poder de contribuir con mis ideas, de modo que cuando la teoría de los gases sea nuevamente resucitada muy poco quede por ser descubierto". Boltzman se suicidó en el año 1906, y seguramente este conflicto que tenía en cuanto a la aceptación de sus ideas por la comunidad científica europea, debe haber jugado un papel importante.

Los desafíos de la intuición estaban empezando a provocar problemas profundos en aquellas mentes deterministas y positivistas de los científicos de fines del siglo XIX. Como el propio Boltzman escribió: "¡Ay, ay, la intuición!".

Antes de terminar de hablar de la física clásica de fines del siglo XIX, hay que mencionar que había una idea introducida por Maxwell, en los años 60, que abrió camino hacia las ideas más importantes de la física del siglo XX, por lo menos en lo que se refiere al tema de la materia. Esta es la idea del campo. A la humanidad le llevó 2000 años creer en las interacciones a distancia (aquello de Newton de que la manzana se cae arriba de la cabeza y porqué se cae, es decir, que la manzana es atraída por la tierra aunque no esté siendo tocada por ésta). Los planetas están siendo atraídos unos por otros, aunque no estén tocándose. Newton no resolvió ese problema, apenas se animó a decir que eso era posible, lo cual ya fue algo fenomenal.

Quien se animó a decir que había algo diferente fue precisamente Maxwell, con la siguiente frase: "Las cargas eléctricas que se atraen a distancia o se repelen a distancia, no es porque no haya nada en el medio, es porque una carga eléctrica emite un campo, ese campo ocupa el espacio y la otra carga eléctrica observa el campo producido por la primera, y es así que se produce la información". El campo eléctrico, después identificado con lo que llamamos luz, actúa como mediador. La idea del mediador en las interacciones fundamentales entre las partículas es esencial para la física del siglo XX. Einstein dijo, unos cuantos años después en un acto de conmemoración del centenario del nacimiento de Maxwell: "Esta transformación en la concepción de la realidad fue la más profunda y fructífera que ocurrió en la física desde Newton".

3.- Treinta años revolucionarios

La revolución comenzó precisamente en el año 1900, con un trabajo de Planck. Se la puede captar, en alguna medida, con esta frase de Alfred North Whitehead del año 1925: "¿Cuál será el absurdo de hoy que será verdad mañana?" Realmente día tras día tenían que convencerse de que la intuición fallaba por el lado que quisiera; aunque un comportamiento pareciera totalmente ridículo, al día siguiente tenían que convencerse de que efectivamente era totalmente posible de que la naturaleza funcionara de esa manera. El desafío al sentido común era tan grande que Einstein dijo: "El sentido común es el conjunto de todos los preconceptos que adquirimos durante los primeros 18 años de nuestra vida". Lo que dice el diccionario sobre el sentido común es que son "las opiniones de hombres comunes, juicios sólidos y prudentes pero en general no muy sofisticados".

La teoría de la relatividad.

Esta teoría se refiere a cómo es el mundo de lo que va muy rápido. Muy rápido quiere decir cerca de la velocidad de la luz, cerca de 300.000 km/s. Y eso es mucho! Al hombre le llevó un par de días ir desde la tierra hasta la luna, con naves muy sofisticadas, pero a la luz le lleva 1 segundo aproximadamente. Como dije anteriormente, la teoría de la relatividad no surge como en la mayoría de las veces en la ciencia, en que se tiene un modelo que describe bastante bien la realidad, hasta que en determinado momento falla. Quiero decir, no había observaciones experimentales directas de objetos que se movieran tan rápido, cuyo movimiento fuera incorrectamente descrito por la teoría Galileana. Lo que a Einstein le llamaba la atención de la descripción Galileana de los movimientos era el concepto de simultaneidad (todos los observadores miden el mismo tiempo, por más que uno se mueva respecto del otro). Como forma de dudar de lo establecido a Einstein se le ocurrió hacer lo que se llamaba experimentos mentales. Él decía por ejemplo: ¿Qué pasa si se quisiera viajar con la luz? Si se pudiera viajar tan rápido acompañando a la luz, entonces a ella se la vería prácticamente quieta. ¿Esto es absurdo? ¿La luz viaja siempre a la misma velocidad?

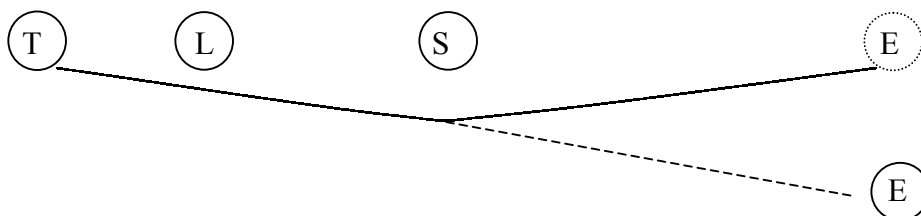
A partir de preguntas que Einstein se comenzó a hacer de esta manera, llegó a formular una teoría de cómo debería ser el mundo para los objetos que viajan a velocidades cercanas a la de la luz. Esta teoría predijo cosas absolutamente diferentes, que comenzaban realmente a desafiar la intuición. Por ejemplo predijo que un cuerpo que viaja a una velocidad cercana a la de la luz, se contrae en la dirección en la que va avanzando; es decir que un observador que lo ve pasar lo ve más corto, en esa dirección, que si el objeto estuviera en reposo. Al mismo tiempo, también predice que un reloj que va a una velocidad cercana a la de la luz avanza más lentamente que el que se queda en reposo. Estas dos predicciones son del año 1905 y corresponden a la teoría especial de la relatividad. También de la relatividad especial es la ecuación $E = Mc^2$, según la cual existe la posibilidad de que la masa y la energía se transformen una en otra.

Otro desafío enorme a la intuición que forma parte del desarrollo que hizo Einstein unos años después es la llamada teoría general de la relatividad, en el año 1911. En esta teoría él ya no se interesa simplemente por cómo se mueven los cuerpos a grandes velocidades, sino por lo que sucede cuando se está en presencia de enormes masas. Aquí uno de los resultados más importantes que predijo es que el espacio geométrico se modifica curvándose en presencia de grandes masas. O sea que existe una relación fundamental entre la materia y el espacio en el cual esta se encuentra inserta. La geometría misma del espacio cambia y se altera el flujo del tiempo por la presencia de materia. Estas son algunas de las ideas que desafían la intuición. Uno entonces se puede formular la siguiente pregunta: ¿Se puede verificar todo esto experimentalmente? La respuesta por supuesto es sí, todas estas ideas fueron y son constantemente verificadas experimentalmente.

Una observación muy interesante para entender cómo es que las cosas que se mueven a gran velocidad tienen un reloj interno que va más lento, es la vida media de los muones de los rayos cósmicos. Los rayos cósmicos son esencialmente protones que llegan a la tierra a altísimas velocidades. Fueron acelerados por un proceso cósmico que aún se desconoce; sólo se sabe que provienen de fuentes extragalácticas, como por ejemplo explosiones de supernovas. Estos protones tienen altísimas energías, del orden de 10^{20} electrón voltios, y entran en la atmósfera interaccionando con las partículas de ella, generando una lluvia de otras partículas entre las que se encuentran los muones, que son “primos” más pesados de los electrones, como veremos en un rato. Para comenzar, la mera creación de estos muones es una verificación de la relación que transforma energía en masa: parte de la energía cinética de los protones se transforma en la masa de los muones.

Pero hay más. Estos muones pueden producirse en el laboratorio y son partículas muy inestables, con una vida media del orden de 2 millonésimos de segundo (2×10^{-6} s). Al cabo de ese tiempo se desintegran en otras partículas; electrones, entre otras. A la velocidad a la que llegan los muones a la atmósfera terrestre, si vivieran solamente 2 millonésimas de segundo, apenas podrían recorrer 600 m, o sea que se crearían en la atmósfera más alta, viajarían 600 m y luego se desintegrarían. Esto contradice el hecho de que se pueden observar muones a la altura del mar, es decir luego de haber atravesado kilómetros y kilómetros de atmósfera. Evidentemente esto sólo puede pasar si de alguna forma, como correctamente predice la teoría de la relatividad, para los muones que se mueven a velocidades muy altas, los tiempos y las distancias son muy diferentes de los tiempos y distancias observados desde la Tierra. Lo que para el observador terrestre son varios milisegundos y unos cuantos kilómetros, para el muón, desde su sistema de referencia, apenas transcurrió un par de millonésimas de segundo y sólo viajó 600 metros.

En cuanto a la relatividad general, una evidencia experimental muy clara, y que predijo Einstein también, es que cuando hay eclipse de luna (cuando la luna se interpone entre la tierra y el sol) se puede observar una estrella, que está en la misma línea que ella, y según nuestra intuición no debería verse. Lo que sucede realmente es que, por ejemplo un rayo que sale de la estrella no llegaría a la tierra, excepto si, como predice la teoría de la relatividad, el espacio es curvado cerca del sol que es una gran masa, y entonces el rayo es desviado llegando a la Tierra. O sea que, una estrella que se sabe que está en ese momento exacto atrás del sol se ve ligeramente al lado del disco solar.



Hay otras evidencias referidas al período de rotación de Mercurio, que es una predicción sobre el movimiento de este planeta, y fue históricamente el primer gran espaldarazo de la teoría de la relatividad general. El último gran ejemplo, este de la relatividad especial, ejemplo lamentable por cierto, es la bomba atómica, o más pacíficamente la energía atómica, en la cual lo que sucede es transformación de masa en energía. Es decir, en el caso de la bomba atómica, cuando un núcleo de uranio se fisiona y se transforma en núcleos menores, la suma de las masas de estos es menor que la masa del núcleo inicial, y esa diferencia de masa se transforma en energía. Esa energía es la que produce la explosión nuclear o la energía nuclear.

Pero además de haber pasado por varias pruebas, la teoría de la relatividad fue también formalizada por un matemático lituano, Hermann Minkowski, que formuló la famosa noción del espacio-tiempo en 4 dimensiones, donde nada precisamente es relativo. Las “distancias” en ese espacio-tiempo de 4 dimensiones son absolutas, independientemente del observador y del sistema de referencia (siempre que sea inercial); lo “relativo” al sistema de referencias, de acuerdo a la visión einsteniana, las distancias usuales del espacio de 3 dimensiones.

La Mecánica cuántica: el desafío final.

La Mecánica cuántica es el segundo gran paradigma del siglo XX. Había que reconciliar experiencia con teoría. La radiación del cuerpo negro fue lo que inspiró a Max Planck, en el año 1900, a hacer lo que el mismo definió como un “acto de desesperación”. Lo que propuso fue pensar en la hipótesis de que la energía esté cuantizada. Concretamente, lo que esto significa es que en el interior del horno, los átomos vibran y emiten luz, pero solamente a determinadas energías. Con esta hipótesis de que la energía está cuantizada y salen paquetes de luz a energías bien precisas, Planck pudo explicar perfectamente y de una manera asombrosa, por la precisión, los datos experimentales de la radiación del cuerpo negro.

La energía es múltiplo de una cantidad muy chiquitita que se conoce con el nombre de la constante de Planck ($h = 6,6 \times 10^{-34}$ J.s). Como la energía es múltiplo de una cantidad tan chiquitita, las energías que normalmente se miden son casi un continuo, porque los saltitos son tan chiquititos en múltiplos de h que no se divisan frente al volumen total de energía. Pero a nivel de la física atómica donde las energías son muy pequeñas, el hecho de que la energía sea discreta y no continua toma un papel absolutamente fundamental.

De la mano de esta hipótesis vino la propuesta de Einstein, en el año 1905, para la explicación del efecto fotoeléctrico. Esta explicación viene por la idea de que el cuanto de luz se llama fotón, y que efectivamente existe y no es simplemente una imaginación de Planck. Mediante esta idea del cuanto de luz, se puede explicar de forma relativamente fácil el efecto fotoeléctrico. El efecto fotoeléctrico, como se dijo anteriormente, es aquel en el que se arroja luz sobre una placa y se pueden arrancar electrones. Pero no se arrancan electrones en función de la intensidad de luz que se envía, sino en función de la longitud de onda de esa luz. Esto se entiende al pensar en que efectivamente los fotones tienen una energía E determinada por la constante de Planck h y la frecuencia ν (la frecuencia es inversa a la longitud de onda) que determina el color del fotón: $E = h \nu$. Si se tiran muchísimos fotones, es decir luz de gran intensidad, pero con una energía individual de cada uno de ellos menor que la energía suficiente para arrancar el electrón, no se arranca ninguno. Se debe llegar a un mínimo de frecuencia para que la energía de esos fotones sea suficiente como para poder arrancar el electrón de la estructura cristalina en la cual está inserto. Por esta explicación fue que Einstein obtuvo el premio Nobel en el año 1921.

Sin embargo, por otro lado, algunos comportamientos de la luz no deberían poder explicarse mediante esta hipótesis de la luz como “paquetitos”. Por ejemplo, los experimentos de interferencia de dos rendijas, en el cual se tira luz sobre dos rendijas y se forma interferencia, sólo pueden ser explicados suponiendo que la luz es un fenómeno ondulatorio, formándose la figura de interferencia en una pantalla. Pero la explicación del efecto fotoeléctrico no exige que la luz sea una onda, sino un conjunto de partículas individuales, los fotones que llegan o no, tienen la energía necesaria o no. Entonces comenzó un gran debate sobre: ¿qué es la luz?, ¿onda o partícula?

Todo esto se complicó mucho más cuando Compton en el año 1923 (recibió el premio Nobel en el año 1927 por este experimento), enviando rayos X, es decir luz a una determinada longitud de onda, sobre una red cristalina, lograba arrancar electrones de forma tal que los fotones se comportaban como partículas mecánicas, como objetos que, literalmente, chocaban contra los electrones, arrancándolos. La visión corpuscular de la luz tuvo así un nuevo espaldarazo.

La hecatombe realmente surgió cuando Luis de Broglie propuso que esa dualidad onda-corpúsculo, no solo se daba para la luz sino también para los electrones. Él propuso que había una longitud de onda

asociada a cada electrón. Esto rápidamente se confirmó de forma experimental. Para ello se realizó el mismo experimento de las dos rendijas pero en lugar de utilizar luz se usaron electrones. Se tiró un haz de electrones por las dos rendijas y atrás se formó una figura de interferencia igual a cuando se utilizaba luz! Lo que probó que realmente hay una naturaleza ondulatoria en el electrón.

Esto fue la hecatombe. ¿Cómo es posible esta dualidad onda-partícula? Había gente que decía que los objetos microscópicos, tanto la luz como los electrones, se comportan como partícula lunes, miércoles y viernes, y como onda martes, jueves y sábado, depende de que día hagamos el experimento. Por supuesto que esto no es así y la profunda discrepancia con la intuición es que una partícula es un objeto muy localizado, que tiene una extensión localizada, mientras que una onda es un objeto extremadamente deslocalizado. Son objetos totalmente diferentes.

El papel del observador es esencial.

¿Cómo se hace para reconciliar esas dos cosas? La respuesta que llevó mucho tiempo encontrar y sobre todo muchísimo más tiempo aceptar, es que depende de la naturaleza del experimento. Es decir que para ciertos tipos de experimentos, la materia se manifiesta de cierta manera y para otros de otra manera. Aquí surge por primera vez la importancia de la presencia del observador, de como el observador incide sobre el objeto de estudio: de acuerdo a la forma en que el observador actúe sobre el objeto de estudio, el objeto reacciona de una manera o de otra.

Un experimento que ayudó a convencer a los escépticos es el siguiente. Se repite la experiencia de interferencia de electrones, pero esta vez se utiliza un cañón de electrones tan eficiente que tira los electrones de a uno. Enfrentado al cañón hay una pared con un par de rendijas, y detrás de la pared hay una pantalla que actúa como detector de electrones. El primer electrón disparado llegó a la pantalla y fue a parar a un lugar. No sabíamos a priori a donde iba a ir a parar, pero terminó siendo detectado en un punto preciso de la pantalla. Este es un solo electrón, o sea que desde que sale del cañón hasta que llega a la pantalla, aparentemente es un objeto bien definido, y llega a un lugar concreto. Impacta en un lugar determinado y no en otro. Se siguen tirando entonces los electrones de a uno, 30, 1.000, 10.000. Resulta que los electrones no fueron a parar al azar, poblando de la misma manera todas las zonas de la pantalla, sino que se fueron distribuyendo en la pantalla de acuerdo con una determinada ley de probabilidad. Lo interesante es que, si el número de electrones es muy grande, se termina formando la misma figura de interferencia como cuando se realizaba el experimento de las dos rendijas, para la luz o para paquetes de electrones. Dicho de otra forma, aunque se tiren electrones individualmente, hay una onda asociada a **cada** electrón, que es la que interfiere consigo misma y que determina con que probabilidad el electrón va a parar a un lugar o a otro. O sea que cada electrón tiene en sí mismo toda la información necesaria como para saber con que probabilidad tiene que ir a parar a un lugar o a otro individualmente. Al cabo del envío de un número muy grande de electrones la ley de probabilidad “actúa” y se termina formando los patrones de interferencia típicos de una información ondulatoria.

¿De qué manera este experimento sirve para ayudarnos a entender cómo la presencia del observador modifica de manera sustancial el comportamiento de una partícula? Para entenderlo, recordemos primero que los electrones efectivamente salen del cañón uno por uno e impactan en la pantalla uno por uno; cada uno “deja” una marca en la pantalla en un “punto” preciso. Podríamos entonces preguntarnos por qué rendija pasó cada electrón. Para esto coloquemos un pequeño detector de electrones justo detrás de una rendija. De esa manera sabremos si el electrón “pasó” por esa o por la otra rendija. Podría decirse que le estamos haciéndole una “trampita” al electrón: por un lado, cada uno de ellos se manifiesta como un objeto puntual ... pero al mismo tiempo para tener el fenómeno de

interferencia la “onda del electrón” debe pasar simultáneamente por ambas rendijas. Pues entonces pongamos un detector detrás de una rendija y veamos que sucede. Y lo que sucede es sorprendente: al colocar el nuevo detector, el resultado del experimento se modifica de manera sustancial. El observador, que quiere “atrapar” al electrón, lo perturba. Y la figura de interferencia desaparece! El pasaje del electrón fue perturbado de una manera tan importante que desaparece el fenómeno ondulatorio y captamos al electrón como una partícula. O sea que si realmente se hace un experimento de interferencia, permitiendo que pase la onda, se va a producir un fenómeno de interferencia; si lo que se quiere es identificar al electrón en un lugar, como a una partícula, esto puede hacerse pero se rompe completamente el patrón de interferencia. El tipo de experimento que se haga determina de manera fundamental cómo se manifiesta el comportamiento del electrón: como onda o como partícula.

Por supuesto que esto fue extremadamente difícil de aceptar. Así se continuó durante mucho tiempo hasta que Schrödinger, hacia fines de la década de los años 20, realiza el avance final. Da una interpretación de la onda asociada a cada objeto. Efectivamente, dice, existe una onda que acompaña a cada objeto, y esta onda lleva la información sobre el estado de la partícula. Schrödinger la llamó función de onda y postuló que es una función que da la probabilidad de la presencia de la partícula en un determinado lugar. Vale decir, asociada a cada partícula existe una función $\Psi(r, t)$, que depende de la posición y del tiempo, y que dice cuál es la probabilidad de que la partícula esté en determinado lugar en este momento.

Es decir que no se puede saber dónde se encuentra exactamente la partícula no porque falte información, o no se tenga una medida suficientemente precisa, o no se conozcan bien las condiciones iniciales, sino porque es algo inherente a la partícula misma. Por ejemplo, si se toma una cajita tan chiquita como se quiera, se puede formular la siguiente pregunta: ¿Cuál es la probabilidad de que la partícula esté ahí adentro? La respuesta se tiene al tomar la función de onda, elevar su módulo al cuadrado y multiplicar por el volumen dV de la cajita; eso da efectivamente la probabilidad de que la partícula esté allí adentro en un instante dado:

$$P(r, t) = |\Psi(r, t)|^2 dV$$

No se puede decir más que eso. Lo único que permite decir la mecánica cuántica respecto de la localización de un objeto (fotón, electrón) es la probabilidad de que ese objeto esté en un determinado lugar.

La función de onda que da esta información evoluciona en el tiempo mediante una ecuación llamada ecuación de Schrödinger, complicada y que implica números complejos:

$$i \hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t} = - \frac{\hbar^2}{2m} \left[\frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial z^2} \right] + U(x, y, z, t) \Psi$$

Todas estas ideas provocaron profundas discusiones entre varias escuelas, en Europa fundamentalmente, y sobre todo constantes desafíos a la intuición.

Planck, quien por primera vez propuso la idea del cuanto para tratar de salvar el problema del efecto fotoeléctrico, escribió lo siguiente en una carta que no envió: "Ud. expresó recientemente el deseo de que yo describiera los aspectos psicológicos que me llevaron a proponer la hipótesis de la cuantización de la energía. Resumidamente puedo describir mi actitud como un acto de desesperación, ya que por naturaleza soy una persona pacífica y contrario a las aventuras irresponsables. Pero desde

1894, pasé años luchando con el problema del equilibrio entre la materia y la radiación sin ningún tipo de suceso. Yo sabía que ese problema era de importancia fundamental para la física y por lo tanto una explicación teórica tenía que ser encontrada a cualquier costo. La física clásica no era suficiente, esto era claro para mí. Esa hipótesis cuántica fue una suposición puramente formal y no pensé mucho en ella excepto por lo siguiente: cualquiera que fueran las circunstancias, cualquiera que fuera el precio a pagar tenía que obtener un resultado positivo". Este era Planck en el año 1900, tratando de llegar a lo inexplicable en ese momento.

Las discusiones siguieron durante muchísimo tiempo después de la propuesta de Schrödinger en la década del 20. Einstein fue, fundamentalmente en su debate con Max Born durante muchos años, un crítico acérrimo de la física cuántica, creyendo que esto no era posible y que si no se podía predecir donde estaba una partícula es porque faltaba alguna información. Por ejemplo en la famosa carta mandada a Born, en diciembre de 1926, escribió: "La mecánica cuántica requiere de una seria atención. Mientras tanto una voz interna me dice que este no es el verdadero Jacob. La teoría es sin duda muy exitosa, pero ella no nos aproxima los secretos del viejo sabio, de cualquier forma estoy convencido de que él no juega a los dados".

Einstein siguió durante muchos años, hasta su muerte en el año 1955, debatiendo sobre la verdad de la mecánica cuántica. Por ejemplo, en el año 1931 escribió: "Todavía estoy inclinado a pensar que los físicos, a largo plazo, no van a contentarse con este tipo de definición indirecta de la realidad"; en 1933 dijo: "Todavía creo en la posibilidad de que construyamos un modelo de la realidad, o sea construyamos una teoría que represente las cosas como son y no apenas las probabilidades de su ocurrencia", y en 1936 afirmó: "Creo que la teoría cuántica podrá llevarnos a errores en nuestra búsqueda de una base uniforme para la física, porque en mi opinión ofrece una representación incompleta de las cosas reales. Es esta la representación incompleta que necesariamente lleva la naturaleza estadística en sus leyes".

A pesar de la intuición de Einstein, no se ha encontrado hasta ahora, a pesar de muchísimos intentos (hay revistas dedicadas a la reformulación de la mecánica cuántica), ninguna posibilidad de refutarla. Se trata de una teoría de una gran belleza y una gran coherencia; y si desafía nuestra intuición aparentemente es esta la que debe cambiar y no la naturaleza!

Lo que me parece importante resaltar es que estos dos paradigmas, aparentemente tan alejados del "mundo real" de fines del siglo XX, estas teorías aparentemente tan alejadas de la realidad humana (describen lo que sucede a altísimas velocidades y lo que sucede a pequeñísimas distancias), paradójicamente están en la base de un gran porcentaje de la tecnología de ese siglo. La comprensión de la relatividad y de la mecánica cuántica permitió el desarrollo de los semiconductores, de toda la electrónica moderna, por supuesto la existencia de los computadores, de una gran variedad de nuevos materiales, así como el uso de la energía atómica y de la bomba atómica. Para bien y para mal, estos paradigmas son el fundamento de una buena parte de la tecnología del siglo XX.

¿Cuánto tiempo llevó pasar de la concepción básica a la creación de tecnología? En muchos casos fueron alrededor de 50 años. Por ejemplo en 1905, Einstein dice que $E = Mc^2$ y en 1945 se tira la bomba atómica sobre Hiroshima. La pila de Fermi es un poco posterior y fue con la que realmente se produjo energía nuclear con fines pacíficos. O sea que tal vez se espere medio siglo o capaz que más, para que las cosas que se están descubriendo ahora en este dominio de la ciencia lleguen a una aplicación práctica concreta, a una innovación tecnológica.

Resumen después de la revolución.

Hay entonces objetos de **materia** (como los electrones) y objetos de **interacción** (como los fotones), en un pie de igualdad, aunque cada uno cumpliendo un papel diferente. De acuerdo con la idea de Maxwell los electrones interactúan enviándose fotones, (“campos eléctricos” o “luz”). Pero si bien se trata de objetos diferentes, tienen características similares: ambos presentan la misma dualidad onda-partícula, esa capacidad de manifestarse de una u otra manera de acuerdo a la forma en que interactuemos con ellos. Para ambos, existe una onda asociada que describe la probabilidad de presencia del objeto en un determinado lugar.

El observador modifica el objeto de estudio de manera esencial y tiene que ser incluido. Su presencia modifica de manera sustancial la medida y eso no es un problema de precisión tecnológica, no es que falte un equipo suficientemente “bueno” y por eso no se pueda conocer con precisión lo que va a pasar. No; simplemente la naturaleza es así. Y a esa escala, esto se pone claramente en evidencia.

Ese mundo microscópico es accesible de manera indirecta, no es como las observaciones que se hacían hasta el siglo XIX, en que el objeto era observado directamente. El hecho de que el objeto de estudio sea observado de manera indirecta a través de terceros objetos, hace que justamente se dude más de la intuición. Nosotros creemos en lo que vemos, ver para creer, si no vemos no creemos.

4.- ¿Qué se hizo después?

¿Cómo ha sido la búsqueda de las componentes elementales y la estructura de la materia a lo largo del siglo XX, basándose en las herramientas que propusieron aquellos que desarrollaron la teoría de la relatividad y la mecánica cuántica? Hay un doble camino, se avanza en una doble carrera: “destapando muñecas rusas” y “unificando”.

Por un lado se van destapando muñecas rusas, es decir, cada vez con mayores energías se va estudiando e “ingresando” en la estructura cada vez más “profunda” de la materia. Así se llegó a que el núcleo atómico en realidad se encuentra formado por otras partículas más elementales, llamadas neutrones y protones. Además se sabe desde el año 1969 que los neutrones y protones también están formados por otras partículas más elementales llamadas quarks. No existe ninguna evidencia experimental hasta ahora de que los quarks a su vez sean partículas compuestas. Lo mismo sucede con los electrones. Hoy en día se cree que los quarks y los electrones son las partículas de materia más elementales que se conocen.

Por otro lado, aparte de abrir muñecas rusas y descubrir los ladrillos más fundamentales, ha habido un largo proceso de unificación de las interacciones. Es que estos objetos fundamentales que conforman la materia, interactúan entre sí. ¿Y qué es esto de la unificación? En el siglo XIX se conocían muchos tipos diferentes de interacciones entre los objetos materiales. Un par de siglos antes Newton comenzó a darse cuenta de que algunas fuerzas aparentemente muy distintas eran manifestaciones diferentes de un mismo tipo de interacción: al observar que la fuerza que hacía que la manzana se le cayera arriba de la cabeza, el peso, era la misma que la fuerza que atraía a los planetas entre sí, la fuerza gravitatoria, Newton se convirtió en el primer “unificador” de interacciones. Pero a mediados del siglo XIX e incluso hasta comienzos del XX, se conocían todavía diferentes tipos de fuerzas, aparentemente desconectadas entre sí. Por ejemplo: la fuerza de fricción, la fuerza elástica, la fuerza eléctrica, la magnética, las fuerzas químicas, las que generan las estructuras biológicas, etc.. Hoy

en día, y gracias fundamentalmente al trabajo de Maxwell, se sabe que todas estas son diferentes manifestaciones de una única fuerza, la fuerza electromagnética.

En este siglo, al ir estudiando el mundo subatómico, se descubrieron otros dos tipos de fuerzas en la naturaleza, llamadas fuerzas nucleares fuertes y débiles. La existencia de la fuerza nuclear fuerte es tal vez bastante esperable: Si los núcleos están formados por neutrones (que no tienen carga eléctrica) y los protones (que tienen carga positiva), y si las partículas con cargas del mismo signo se repelen, ¿cómo hace la naturaleza para mantener juntas, en una pequeñísima región del espacio, a tanta cantidad de cargas con el mismo signo? La única respuesta es que tiene que haber otra fuerza más potente que la fuerza de repulsión electromagnética, que mantenga juntos a los protones en el núcleo. Esta es la fuerza nuclear fuerte. Por último, la fuerza nuclear débil es la que se pone de manifiesto cuando se producen las interacciones radioactivas.

El camino de la progresiva unificación de las interacciones fundamentales es, en definitiva, un proceso en el que vamos comprendiendo que la naturaleza es mucho más simple de lo que podía parecer.

¿Cómo se hacen los experimentos?

Intentaré entonces describir de qué manera, en este siglo, se fue avanzando en este camino de descubrimiento de las partículas elementales y de la forma en que interactúan entre sí.

Empezaré por el principio, que a pesar de que a los físicos teóricos nos cueste a veces mucho aceptar, son los experimentos. Como dijo Sir Arthur Stanley Edington: "Experimental results should not be believed until confirmed by theory" (Los resultados experimentales sólo deben ser creídos una vez que se han confirmado por la teoría), lo cual fue una broma o una expresión de deseo. Como físico teórico que soy, estoy absolutamente convencido de que la física de partículas, en particular del siglo XX, se basa fundamentalmente en que han habido excepcionales experimentadores. Muchos de ellos han recibido premios Nobel, porque los experimentos realizados representaron un desafío intelectual mayúsculo. Muy brevemente analizaré cómo las herramientas metodológicas han sufrido un cambio esencial.

Para poder estudiar la materia en su aspecto más microscópico, se necesita mucha energía. La palabra “microscópico” puede parecer totalmente inadecuada, dado que en realidad no es con simples microscopios que pueden observarse estos sistemas físicos. Sin embargo, los instrumentos para el estudio de esta rama de la física, los **aceleradores de partículas**, son una especie de microscopios muy potentes. Si se tira una bala, a una velocidad relativamente baja, no penetra en el blanco; rebota. Para que la bala penetre tiene que ir a una gran velocidad. Por lo tanto para poder ir “viendo” “adentro” de la materia y así ir destapando cada vez más muñecas rusas, se necesitan energías cada vez mayores. Entonces se precisan máquinas llamadas aceleradores, que lo que hacen es producir haces de partículas a enormes velocidades, enviarlos contra blancos, (fijos en algunos casos, también móviles en otros) y generar así partículas secundarias.

La idea es la misma que llevó a Rutherford, a principios del siglo XX, a hacer el famoso experimento en el que tiró partículas α sobre una placa de oro con un detector atrás, y observó que la gran mayoría de las partículas seguían de largo, con lo cual se dio cuenta de que en realidad la materia estaba “llena de vacío”. De aquí sale la famosa idea de que los átomos tienen un núcleo central, con electrones girando alrededor. Para tener una idea de “lo vacío” que es un átomo, si el núcleo atómico

tuviera el tamaño de una naranja y la pusiéramos en el centro de un estadio, los electrones andarían girando más o menos por las tribunas. Esta idea fundamental de Rutherford, de acelerar partículas, tirarlas contra la materia, y en función de cómo “rebotan” y para dónde van a parar entender cómo es la estructura del objeto, usar esto como una sonda, es la idea que se repitió a todo lo largo del siglo en los aceleradores de partículas. Se aceleran partículas, se tiran contra un blanco, se detectan las partículas producidas, y con eso se entiende qué fue lo que pasó “ahí adentro”.

Hay básicamente dos tipos de aceleradores, lineales o circulares, y con diferentes tipos de haces de partículas (electrones, protones, fotones, piones, etc.). Desde el primer aparato han habido muchos cambios. Por ejemplo el acelerador lineal de SLAC (Stanford Linear Accelerator Center) es un gran acelerador de 3 km de largo. En el CERN (Centro Europeo de Investigación Nuclear) hay un acelerador circular, ubicado en la frontera entre Francia y Suiza. Este acelerador se llama LEP; es un colisionador en el cual circulan electrones hacia un lado y positrones (la antipartícula del electrón) hacia el otro, y se desvían chocando en 4 lugares. El LEP tiene 27 km de largo. Es un túnel que está a 100 m de profundidad para evitar radiaciones secundarias. Es sin duda la máquina más grande construida por el hombre.

Además de los aceleradores es necesario detectar las partículas producidas. Para eso se utilizan aparatos llamados detectores, que se construyen en función de cada experimento. Son aparatos que detectan las partículas producidas y determinan su carga, masa, momento, energía y trayectoria. Hay diferentes técnicas de detección y lo más interesante es que se trata de medidas indirectas. Cada partícula que llega a un detector genera una señal electrónica que luego es amplificada y almacenada. Lleva años estudiar los resultados de un experimento de este tipo. La reconstrucción de lo que sucedió es una técnica muy compleja.

Para poder hacer todo esto se necesita mucha gente. Hay experimentos de más de 1.000 físicos y de varios cientos de ingenieros para poder desarrollar estos equipos. Se precisa una altísima tecnología. Un aspecto interesante de estos experimentos, es que para poder construirlos es necesario realizar desarrollos propios de tecnología. A partir de ellos hubo interesantes avances en nuevos materiales, en informática, en tecnología del vacío, en microelectrónica, etc.. Por ejemplo, la "www" de internet surgió en el CERN. Es por eso que, si bien estos experimentos cuestan muchísimo dinero, estudios dicen que por cada dólar que se invierte en el CERN se recuperan 3 en desarrollo tecnológico utilizable.

¿Qué se aprendió?

Interacciones de la naturaleza

A partir de estos experimentos se ha aprendido mucho sobre las interacciones de la naturaleza. Se sabe hoy que hay sólo **tres** tipos de interacciones en la naturaleza: por un lado la interacción gravitacional, por otro lado la interacción nuclear fuerte y por otro la que se llama la interacción electrodébil que integra a la fuerza electromagnética y a la interacción nuclear débil. En efecto, hoy sabemos que la interacción electromagnética y la interacción nuclear débil, en realidad son dos manifestaciones diferentes de la misma fuerza, así como sabíamos que las fuerzas eléctrica y magnética son dos manifestaciones de la fuerza electromagnética. Para una partícula que fuera sensible tanto a la fuerza fuerte, como la electrodébil y la gravitatoria, se encontraría que la fuerza gravitatoria es 10^{40}

veces menos potente que la fuerza nuclear fuerte (10^{-40}), y que a su vez esta última es 10^{13} veces más fuerte que la débil (10^{-13}) y 10^3 veces más fuerte que la electromagnética (10^{-3}).

Partículas elementales

Hoy creemos que hay dos tipos de partículas elementales: por un lado las que se llaman partículas de materia constituidas por los leptones y los quarks, y por el otro lado las llamadas partículas de interacción o bosones intermediarios. Hay dos tipos de leptones: con carga eléctrica, como el electrón, y sin carga eléctrica, como el neutrino. Por otro lado, los quarks, que presentan la particularidad de tener una “carga eléctrica fraccionaria” (es decir, una fracción de la carga del electrón), tienen $-1/3$ o $2/3$ de la “carga elemental”.

Tanto quarks como leptones sufren las interacciones electrodébiles (además de la gravitatoria), pero la diferencia entre ambos es que sólo los quarks son sensibles a la fuerza fuerte. Por ello es que son los quarks, unidos por la fuerza fuerte, los que constituyen los protones y demás partículas subatómicas, genéricamente llamadas hadrones. Hay dos tipos de hadrones: un tipo son los bariones, que tiene tres quarks adentro como el protón y el neutrón; y el otro tipo son los mesones, formados por un quark y un anti-quark, como por ejemplo el pión.

Un hecho importante es que los quarks, si bien son observados, no pueden ser extraídos de adentro de un hadrón. Se dice entonces que los quarks están confinados dentro de estas partículas compuestas. No comprendemos aún totalmente el confinamiento. Es este un tema abierto en la física de partículas.

En cuanto a las masas, en la física de partículas se utiliza la ecuación de Einstein ($E = Mc^2$) que da la equivalencia entre masa y energía, para medir las masas en unidades de energía. La masa del protón, por ejemplo, es casi 1.000 Mev. La masa del electrón es de $1/2$ Mev. No se sabe aún si el neutrino (ν_e) tiene masa y esta información es absolutamente fundamental. Si la tuviera, podría ser responsable de la llamada materia oscura del Universo. Los neutrinos juegan también un papel muy importante en las explosiones de supernovas. Algunos experimentos muy recientes muestran que aparentemente tendrían una masa muy pequeña. Por otro lado, los quarks tienen masas relativamente chicas comparadas con la de un protón (apenas unos pocos Mev's).

Por otro lado las partículas de interacción son los llamados “bosones intermediarios”. Cada interacción tiene su (o sus) partículas mediadoras. El fotón es el mediador de la interacción electromagnética. Es una partícula sin masa. Los gluones, que son 8, son los mediadores de la interacción nuclear fuerte. No tienen ni masa ni carga eléctrica. Son los responsables de que los quarks permanezcan unidos entre sí para formar los protones y estos últimos para formar el núcleo atómico. Hay tres mediadores de la interacción nuclear débil, ya que hay una cargada y otra neutra. Se llaman W^\pm y Z^0 , los primeros son cargados y el segundo es neutro. A diferencia del fotón y los gluones, estos últimos bosones intermediarios, tienen una masa enorme: 80 y 90 veces la masa de un protón.

Dado que la fuerza de la gravedad es de un orden de magnitud muy diferente al resto de las fuerzas, es muy difícil poder testarla en experimentos de este tipo o sea que se considera despreciable. Esto ha hecho entre otras cosas que haya flojas herramientas experimentales para poder tener una teoría microscópica de la gravitación.

Por último, asociado a cada partícula elemental existe una anti-partícula. Esta es una partícula idéntica cuya diferencia principal es tener la carga eléctrica opuesta.

La tabla de partículas elementales de hoy en día es el equivalente a la tabla creada por Mendeléiev a fines del siglo XIX. Por un lado se encuentran los leptones y los quarks que corresponden a las partículas de materia, y por otro lado los bosones intermediarios que son las partículas de interacción. En las siguientes tablas se presentan algunas características de dichas partículas.

Partículas de materia.

Leptones (spin $\frac{1}{2}$)	Leptón	Carga	Masa (Mev)
	E	-1	0,511
	ν_e	0	0 (?)
Quarks (spin $\frac{1}{2}$)	Sabor	Carga	Masa (Mev)
	D	-0,333333	~ 7
	U	0,666667	~ 5

Partículas de interacción.

Bosones intermediarios (spin 1)	Mediador	Carga	Masa (Mev)	Fuerza
	Fotón	0	0	Electromagnética
	W^\pm	± 1	81.800	Interacción nuclear débil cargada
	Z^0	0	92.600	Interacción nuclear débil neutra
	Gluón	0	0	Interacción nuclear fuerte

Lo notable, y fue la última gran sorpresa del siglo XX, es que por alguna razón, que es todavía absolutamente desconocida, la estructura de la materia que describí en realidad está por triplicado. Quiero decir: con el electrón, el neutrino y los quarks llamados "up" y "down", se forma la totalidad de la materia estable del universo. Sin embargo, existen otras partículas elementales inestables, que a su vez forman hadrones y otras estructuras también inestables. Y lo interesante es que esas otras partículas son exactamente idénticas a las que describimos, diferenciándose sólo en que su masa es mayor. Por ejemplo el muón ya nombrado, es una partícula prima del electrón y se produce en los rayos cósmicos, su vida media es de 2 millonésimos de segundo. El τ tiene una vida media mucho más chica. Lo mismo pasa con la familia de los quarks que también vienen por triplicado. Así como los quarks u y d forman las partículas compuestas estables (como protones y neutrones) se pueden fabricar otros bariones con masas mayores usando estos quarks más pesados. La diferencia esencial entre una familia de quarks y otra es la masa de las partículas, el resto es similar; tienen las mismas características de spin y de carga eléctrica. No se sabe por qué la naturaleza está triplicada, simplemente cambiando la masa de las partículas.

	Leptón	Carga	Masa	Vida media
Primera familia	e	-1	0,511	∞
	ν_e	0	0 (?)	∞
Segunda familia	μ	-1	105	2×10^{-6}
	ν_μ	0	0 (?)	∞
Tercera familia	τ	-1	1784	3×10^{-13}
	ν_τ	0	0 (?)	∞

Quarks	Sabor	Carga	Masa
Primera familia	d	- 1/3	~ 7
	u	2/3	~ 5
Segunda familia	s	- 1/3	~ 150
	c	2/3	1200
Tercera familia	b	- 1/3	4200
	t	2/3	175000

La teoría.

Hay dos grandes teorías que describen las partículas elementales y la interacción entre ellas: la cromodinámica cuántica y la teoría electrodébil, aunque históricamente deberíamos considerar una tercera. Quiero decir, cronológicamente, la primer gran teoría, base de las actuales, es la *electrodinámica cuántica*, o QED (por su sigla en inglés). Describe la interacción de partículas cargadas a pequeñas distancias. Es decir, es el electromagnetismo en todo rango de distancias. La QED ha tenido un éxito maravilloso y sus predicciones son de una precisión de 1 en 10^{11} . Esto es como si fuéramos capaces de predecir, por ejemplo la distancia desde la Facultad de Ciencias hasta Fortaleza con una precisión del espesor de un cabello. Como los experimentos han alcanzado también esta precisión, podemos decir que QED está ampliamente testada!

Con el mismo patrón formal se construyó la *cromodinámica cuántica* (o QCD), teoría que describe la interacción nuclear fuerte. No tiene resultados tan maravillosos como la primera simplemente porque no se sabe cómo calcular todo lo que se mide.

Con un patrón formal muy similar (las tres teorías son muy semejantes, como comentaré enseguida), surge la *teoría electrodébil* (Glashow – Salam – Weinberg) que unifica la interacción nuclear fuerte con la interacción electromagnética. Por esta razón decíamos antes que QED es en realidad una reliquia histórica, hoy absorbida en la teoría electrodébil. Esta teoría también ha sido muy exitosamente testada experimentalmente.

La base formal de estas teorías la constituye una herramienta teórica que se llama la teoría de campos, y están fuertemente sustentadas en las simetrías de la naturaleza.

Teoría de campos.

La teoría de campos se basa en las ideas de la mecánica cuántica. A cada partícula, sea de materia o de interacción, se le asocia un campo que describe la probabilidad de presencia de esa partícula. Luego se construye una funcional llamada lagrangeano, que determina cómo van a evolucionar esas funciones de onda e interactuar entre sí. Las teorías bien aceptadas desde hace unos cuantos años, que describen las partículas elementales y la forma en que interactúan, están basadas en esta teoría, que fue creada a partir de las ideas de la mecánica cuántica.

5.- Luces y sombras (hacia el siglo XXI)

Considero que existe una comprensión unificada de la estructura de la materia. Existen partículas de materia y partículas de interacción en pie de igualdad, simplemente cada una cumple un rol diferente. Tenemos teorías robustas que describen las interacciones electrodébil y nuclear fuerte. Recordemos que las predicciones son probabilísticas y no determinísticas. Además existe un buen acuerdo teórico-experimental. Recordemos que no todo lo que se mide es calculable; por ejemplo la cromodinámica cuántica que describe la interacción entre los quarks, no puede explicar por qué los quarks están confinados dentro de los hadrones y no pueden desplazarse libremente en la naturaleza. Pero en todo caso, no se ha encontrado ninguna contradicción entre los experimentos realizados durante los últimos 30 años y las predicciones de las teorías.

Preguntas sin respuesta.

¿Por qué hay tres familias de partículas? ¿Por qué la naturaleza decidió hacer todo por triplicado? No hay ninguna diferencia entre una familia y las otras, solo que una es estable y forma todas las estructuras de nuestro universo y las otras son copias inestables simplemente con una masa mayor. Numerosos experimentos estudian estas partículas inestables y sus propiedades.

¿Cuál es el origen de la masa de las partículas? La teoría electrodébil propone un mecanismo para explicar este origen: existiría una partícula más, llamada el bosón de Higgs, presente en todo el espacio, cuya interacción con las partículas conocidas es lo que les genera una masa. Sin embargo, esta es una partícula, predicha por este modelo, que aún no ha sido encontrada. Diversos esfuerzos experimentales están dedicados a buscar al Higgs.

¿Por qué algunas simetrías de la naturaleza están “violadas”? De acuerdo a las teorías descritas, existe una irreversibilidad microscópica: algunos procesos ocurren en un cierto sentido del tiempo pero no pueden existir en el sentido contrario. Esta irreversibilidad esencial genera la asimetría entre materia y anti-materia en el Universo. Es decir, si todos los procesos fueran reversibles, tendríamos un equilibrio entre materia y anti-materia. Como las observaciones astronómicas nos muestran que el Universo está formado sólo (o fundamentalmente) por materia, esta asimetría es necesaria. El mecanismo que produce esta violación de simetría está actualmente en estudio, tanto teórico como experimental.

Otro problema ya señalado es el de la materia oscura del universo. Estudiando los movimientos de las galaxias se observa que, aparte de la masa contenida en las estrellas, hay otra masa que no se ve, que no llega a manifestarse ante nosotros de forma evidente y es enorme, conformando el 90 % de la materia del universo. La posibilidad de que los neutrinos tengan masa o la posible existencia de otras

partículas elementales muy débilmente interactuantes (lo que explicaría que aún no las hayamos detectado), podrían explicar esta materia oscura.

Recordemos también que existen algunas observaciones que no se saben predecir. Por ejemplo, no se entiende completamente el confinamiento. ¿Por qué los quarks están confinados adentro de los neutrones y los protones? Importantes esfuerzos teóricos apuntan a aclarar este punto.

Los grandes pasos que quedan por dar

Quedan también algunos grandes pasos a encarar.

Unificación de la interacción nuclear fuerte con la electrodébil: intentar mostrar si, en realidad, la interacción nuclear fuerte y la electrodébil son dos manifestaciones diferentes de una misma fuerza, así como se sabe que el electromagnetismo y la interacción nuclear débil son dos manifestaciones diferentes de la fuerza electrodébil, así como también se sabe que la electricidad y el magnetismo son dos manifestaciones diferentes de la fuerza electromagnética.

Teoría cuántica de la gravedad: se está muy lejos todavía de tener una teoría que describa la gravedad a pequeñas distancias, tanto por dificultades teóricas como experimentales. No se ha logrado hacer congeniar la teoría de la relatividad general de Einstein con la mecánica cuántica.

Gran unificación: el sueño último sería la llamada teoría de la gran unificación, vale decir, que en una única teoría se describieran la gravedad, la interacción nuclear fuerte y la electrodébil.

Otro tema que no es menor, pero si de orden diferente, es la dificultad cada vez mayor de confrontar la teoría con el experimento. Las teorías exigen, cada vez más, experimentos muy difícilmente desarrollables. Se necesitan enormes energías para acelerar partículas, que no son accesibles por problemas de costo y desarrollo tecnológico.

Una nota positiva, que parece clave, y seguramente se seguirá profundizando más en el siglo XXI, es la creciente relación entre la física de lo más pequeño (física de partículas) y la de lo más grande (astrofísica).

14 de setiembre de 1999.